

# SISTEMA AUTOMÁTICO PARA CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES A FIBRA ÓPTICA PARA ALTA TENSÃO

Anderson Wedderhoff Spengler

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas, orientada pelo Prof. Doutor Elnatan Chagas Ferreira, aprovada em 29 de julho de 2010. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

UNICAMP  
Campinas  
2010

Este exemplar correspondente à redação final da Dissertação/Tese defendida por: Anderson Wedderhoff Spengler e aprovada através da Comissão Julgada em: 29/07/2010

  
orientador

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Sp33s	<p>Spengler, Anderson Wedderhoff</p> <p>Sistema automático de caracterização de sensores a fibra óptica para alta tensão / Anderson Wedderhoff Spengler. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.</p> <p>Orientador: Elnatan Chagas Ferreira.</p> <p>Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Controle automático - Instrumentação. 2. Alta voltagem. 3. Controladores PID. 4. Eletrônica - Instrumentos. I. Ferreira, Elnatan Chagas. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: Characterization system for fiber optics based sensors for high-voltage

Palavras-chave em Inglês: Automatic control - Instrumentation, High voltage, PID Controllers, Electronic - Instruments

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Antônio Heronaldo de Souza, José Antônio Siqueira Dias

Data da defesa: 29/07/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidato:** Anderson Wedderhoff Spengler

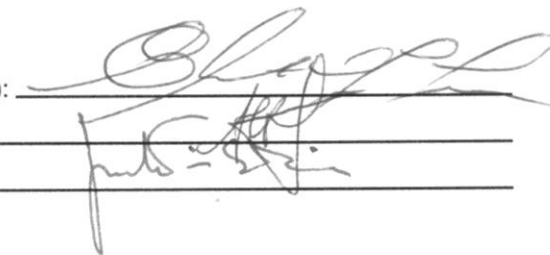
**Data da Defesa:** 29 de julho de 2010

**Título da Tese:** "Sistema Automático para Caracterização de Sensores a Fibra Óptica para Alta Tensão"

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira (Presidente):

Prof. Dr. Antonio Heronaldo de Sousa:

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias:

The image shows three handwritten signatures in black ink, each written over a horizontal line. The first signature is for Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira, the second for Prof. Dr. Antonio Heronaldo de Sousa, and the third for Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias. The signatures are fluid and cursive.

*“A imaginação irá levar-nos frequentemente a mundos que nunca existiram. Mas sem ela não chegaremos a lugar nenhum”.*

*Carl Sagan*

*À Daiane, meus pais, meus tios e avós.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço especialmente a todas as pessoas que foram essenciais para que conseguisse chegar a este ponto, e que certamente não será o fim e sim, um trecho de uma longa jornada.

Aos meus pais, avós e tios que sempre me impulsionaram e auxiliaram desde o início da minha vida, ao apoio e compreensão da minha amada, em vista o tempo que necessitei para desenvolver este projeto.

A companhia de meus colegas de departamento, Wellington, Felipe, Rafael, Luís, Alcino, Hugo, Alex, Jefferson e Rodrigo, no desenvolvimento e a inestimável ajuda proporcionada.

Ao meu orientador, Prof. Elnatan, e ao Prof. Siqueira pela oportunidade de desenvolver o projeto e pela agradável convivência neste período, à Ester pela ajuda sempre que necessária.

## RESUMO

Esta dissertação aborda o projeto de um sistema de caracterização de sensores baseados em fibras ópticas para alta-tensão. O sistema é formado por dois módulos principais, um relacionado com a câmara térmica e outro relativo à alta-tensão. O desenvolvimento do sistema deve-se basicamente às necessidades de personalização e precisão para a caracterização dos sensores e outras aplicações. A câmara climática tem seu projeto eletrônico e mecânico descritos, com ênfase na utilização de módulos termoeletrônicos, nos controladores proporcional-integral-derivativos utilizados e os parâmetros de sintonia encontrados. Foi feito o estudo da configuração que utiliza dois módulos termoeletrônicos em série, apontando as vantagens e desvantagens desta configuração. A faixa de temperatura para a câmara obtida é de 0 °C até 70 °C, com erro  $\pm 0,1$  °C semelhantes às câmaras climáticas comerciais. Há a proposta de um circuito gerador e analisador de ondas arbitrárias de alta-tensão, e ensaios com um sistema semelhante ao proposto para tensões de até 15 kV, para validação do método de eliminação de harmônicas proposto nesta dissertação, obtendo resultados de THD da ordem de 0,04%, valor este limitado pela definição do analisador de sinais.

## **ABSTRACT**

This work discusses the project of a characterization system fiber optics based sensors for high-voltage. The system consists of two main modules, one related to the thermal chamber and another on high-voltage part. The system development was mainly due to the needs of customization and precision for the characterization of sensors and other applications. The thermal chamber has its electronic and mechanical design described, with emphasis on the use of thermoelectric modules, the proportional-integral-derivative controllers and their tuning parameters. A study was conducted on the configuration that uses two thermoelectric modules in series, showing the advantages and disadvantages of this configuration. The obtained temperature range for the chamber was 0°C to 70 °C with  $\pm 0.1$  °C error, similar to the commercial chambers. There is a proposal for a circuit for arbitrary high voltage wave generator and analyzer, and tests with one system similar to that proposed for voltages up to 15kV, to validate a harmonics eliminator method, obtaining results of THD about 0.04% which is limited by the definition of signal analyzer.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Visão geral do sistema proposto .....	5
Figura 2.2 – Diagrama de blocos do Módulo de Interface .....	7
Figura 2.3 – Diagrama de blocos do Módulo Câmara .....	8
Figura 2.4 – Diagrama de blocos do Módulo de Alta-Tensão .....	10
Figura 3.1 – Parte do circuito que engloba o FTDI, EEPROM e conector USB. ....	11
Figura 3.2 – Parte do circuito que engloba o PIC e a Memória. ....	12
Figura 3.3 – Parte do circuito que engloba a gravação ICSP.....	13
Figura 3.4 – Parte do circuito responsável pelo barramento de comunicação RS485. ....	14
Figura 3.5 – Diagrama esquemático da parte do circuito contendo o PIC16F873A.....	15
Figura 3.6 – Parte do circuito contendo os sensores. ....	16
Figura 3.7 – Parte do circuito com o conversor digital-analógico e tensão de referência. ....	16
Figura 3.8 – Parte do circuito contendo o conector e isolador.....	17
Figura 3.9 – Gráfico com a resposta do divisor de tensão para o NTC.....	18
Figura 3.10 – Parte do circuito de condicionamento do sinal do NTC.....	18
Figura 3.11 – Parte do circuito de condicionamento do AD590.....	19
Figura 3.12 – Parte do circuito com o controle PID e amplificador de erro. ....	20
Figura 3.13 – Amplificador de erro na entrada do controlador PID. ....	20
Figura 3.14 – Parte do circuito com o limitador. ....	21
Figura 3.15 – Parte do circuito que gera a onda triangular. ....	22
Figura 3.16 – Parte do circuito com o comparador.....	22
Figura 3.17 – Parte do circuito com o optoisolador e o <i>driver</i> de potência.....	23
Figura 3.18 – Esquemático da ponte H utilizada para acionar os TEM.....	24
Figura 3.19 – Retificador utilizado na alimentação da parte de potência. ....	25
Figura 3.20 – Janela do programa AZTEC.....	26
Figura 3.21 – Foto da câmara com vista do interior. ....	27

Figura 3.22 – Diagrama da montagem dos TEM.....	27
Figura 3.23 – Foto da montagem dos TEM, blocos de cobre e dissipador sem o isolante.....	28
Figura 3.24 – Foto da câmara montada. ....	29
Figura 3.25 – Circuito pré-amplificador do sinal para alta tensão.....	30
Figura 3.26 – Foto do transformador de alta tensão. ....	31
Figura 3.27 – Foto do sistema de alta tensão. ....	31
Figura 4.1 – Diagrama da rotina executada pelo microcontrolador do módulo de interface.....	32
Figura 4.2 – Diagrama da rotina executada pelo microcontrolador do módulo câmara. ....	34
Figura 4.3 – Diagrama de blocos da rotina em Labview para a câmara térmica.....	36
Figura 4.4 – Janela principal do programa em Labview para a câmara térmica. ....	37
Figura 4.5 – Janela com aba com todos os gráficos da câmara térmica aberto. ....	37
Figura 4.6 – Diagrama de blocos da rotina executada pelo programa em Labview. ....	38
Figura 4.7 – Janela principal do programa em Labview para a parte de alta-tensão. ....	40
Figura 4.8 – Janela com gráfico do sinal de saída do gerador de funções. ....	41
Figura 4.9 – Janela com gráfico do sinal no domínio da frequência.....	41
Figura 5.1 – Gráfico utilizado para corrigir a temperatura. ....	43
Figura 5.2 – Gráfico do ensaio para determinação da menor temperatura. ....	43
Figura 5.3 – Gráfico da diferença de temperatura pela potência transportada. ....	45
Figura 5.4 – Gráfico da obtenção da melhor configuração para resfriamento.....	46
Figura 5.5 – Dispositivo com 4 estágios.....	47
Figura 5.6 – Gráfico da obtenção da melhor configuração para aquecimento. ....	49
Figura 5.7 – Gráfico das oscilações na temperatura intermediária. ....	51
Figura 5.8 – Curva da descida da temperatura para estabilização do sistema em 0°C. ....	52
Figura 5.9 – Variação da temperatura no tempo próximo à 0°C. ....	53
Figura 5.10 – Curvas das temperaturas do sistema para ajuste de 70°C. ....	54
Figura 5.11 – Variação da temperatura próxima à 70°C. ....	55
Figura 5.12 – Curvas de temperatura para diversos setpoints. ....	56

Figura 5.13 – Reação do sistema à perturbação próxima à 9,8°C. ....	57
Figura 5.14 – Temperatura interna quando há perturbação próxima à 9,8°C. ....	58
Figura 5.15 – Reação do sistema à perturbação próxima à 50,2°C. ....	59
Figura 5.16 - Gráfico da temperatura interna quando há perturbação próxima a 50,2°C. ....	59
Figura 5.17 - Gráfico do sinal de 1kHz antes da eliminação das harmônicas. ....	61
Figura 5.18 - Gráfico do sinal de 1kHz depois da eliminação das harmônicas. ....	61
Figura 5.19 - Gráfico do sinal de 60Hz antes da eliminação das harmônicas. ....	62
Figura 5.20 - Gráfico do sinal de 60 Hz depois da eliminação das harmônicas. ....	63
Figura 5.21 - Gráfico do espectro do sinal de 60 Hz na saída do gerador de funções. ....	64
Figura A.1 – Diagrama de blocos do Módulo de Alta Tensão. ....	69
Figura B.1 – Esquemático do circuito auxiliar proposto. ....	75
Figura C.1 – Gráfico para caracterização do sistema usando o método de Ziegler-Nichols. ....	76
Figura C.2 – Tabela para obtenção dos ganhos utilizando o método de Ziegler-Nichols. ....	77
Figura C.3 – Gráfico da obtenção dos parâmetros para o método de Cohen-Coon. ....	78
Figura D.1 – Gráfico comparativo das câmaras térmicas comerciais com a câmara desenvolvida. ....	80
Figura D.2 – Gráfico comparativo dos Hipots comercializados e do desenvolvido. ....	80

## LISTA DE TABELAS

**Pág.**

TABELA 5.1 – Parâmetros encontrados através da elevação dos ganhos .....	51
TABELA C.1 – Ganhos pelo método de Ziegler-Nichlos .....	77
TABELA C.2 – Ganhos calculados pelo método de Cohen-Coon.....	79

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 PROJETO DO SISTEMA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Visão Geral do Sistema .....	5
2.2. Módulo de Interface .....	6
2.3. Módulo Câmara .....	8
2.4. Módulo de Alta-tensão .....	9
<b>3 PROJETO DOS BLOCOS DO SISTEMA .....</b>	<b>11</b>
3.1. O Módulo de Interface .....	11
3.2. O Módulo Câmara .....	14
3.3. Módulo de Alta-Tensão .....	29
<b>4 SOFTWARES .....</b>	<b>32</b>
4.1. Programas dos PICs .....	32
4.2. Programas em Labview .....	35
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>42</b>
5.1. A Câmara Térmica .....	42
5.2. Resultados Relativos ao Módulo de Alta-tensão .....	60
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE A – PROPOSTA DE CIRCUITO PARA O MÓDULO DE ALTA-TENSÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE B – PROPOSTA AUXILIAR DE AQUECIMENTO .....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE C – CÁLCULOS DE SINTONIA PID .....</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICE D – COMPARATIVOS NA FORMA GRÁFICA .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO A – ESQUEMÁTICOS DOS CIRCUITOS DO SISTEMA .....</b>	<b>81</b>
A.1 Módulo de Interface .....	81
A.2 Módulo Câmara .....	82

## 1 INTRODUÇÃO

Há alguns anos o Departamento de Eletrônica e Microeletrônica da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação pesquisa e desenvolve sensores baseados em fibras ópticas, com foco especial no sensoriamento com a utilização de transdutores e sensores de fibra com grade de Bragg, objetivando a obtenção de sensores ópticos de baixo custo, para utilização na rede de distribuição de energia elétrica.

Para a caracterização dos sensores desenvolvidos para altas-tensões usa-se um *Hipot*, equipamento cujo nome é uma abreviação de *High potencial*, isto é, alto potencial, e que geralmente consiste de uma fonte de alta voltagem e um medidor de corrente. Os testes utilizam tensões de 15kV, e o *Hipot* disponível tem erro da ordem de centenas de volts para esta tensão, não há medida relativa as distorções harmônicas no sinal e o formato do sinal resume-se a somente uma senóide.

Além de testes com a alta-tensão, motivada pelo desenvolvimento de um sensor de alto desempenho, medidas de temperatura para compensação de efeitos também são necessárias, implicando assim no uso de uma câmara térmica para geração de um ambiente com temperatura controlada. Esta câmara é um instrumento grande, já que o *Hipot* e os instrumentos para aferição e controle do sensor precisavam ser colocados dentro da câmara para que não houvesse interferência do ambiente externo ao criado internamente na câmara durante as medidas.

Tendo em vista essas dificuldades optou-se então pela construção de um sistema para caracterização dos sensores para alta-tensão baseados em fibras ópticas. Este sistema consiste basicamente das duas partes, um instrumento semelhante ao *Hipot* e uma câmara térmica.

O instrumento que desempenhará o papel do Hipot equivale a um gerador de sinais de alta-tensão, com tensão máxima de 15kV, a corrente exigida para os testes é baixa, acarretando na baixa potência do *Hipot*. Contudo o que é imprescindível neste gerador de sinais é o controle preciso de tensão de saída, inclusive com a proposta de uma técnica para compensação de harmônicas indesejadas existentes no sinal, isto para possibilitar um erro da ordem de algumas dezenas de volts, e não mais centenas de volts no sinal de saída.

Este controle é feito na forma de uma malha fechada realimentada, usando equipamentos de medida para observar o que há na saída do *Hipot*, ou seja, amostrar o sinal gerado e analisá-lo no computador que toma as decisões para correção do sinal.

A pesquisa de *Hipots* comerciais (Multitec, High Voltage Inc, Vitrek) retornou que os equipamentos na faixa de operação próxima ao que foi construído, até 15 kV, tem normalmente frequência de saída de 50-100 Hz e suportam correntes médias de 5 mA. Os erros na geração do sinal de saída podem ser de 2% para a amplitude, e de até 5% de distorção no sinal.

São três características que se deseja obter do sensor utilizando um equipamento semelhante ao *Hipot*: medida da distorção, características na banda de frequência e sensibilidade entrada/saída. Para a distorção o conhecimento da amplitude é irrelevante, o importante nesta medida é a pureza ou o conhecimento do sinal que é entregue ao sensor. Para levantar as características de banda o sinal gerado precisa possuir a mesma amplitude por toda a banda de frequência, o que implica em gerar um sinal com vários tons e todos com a mesma amplitude, ou gerar um tom de cada vez garantindo que a amplitude seja sempre igual.

Tendo em vista a necessidade de aferir as três características supracitadas, o sistema para a calibração deverá fornecer uma onda com a menor distorção possível e capaz de reproduzir a amplitude do sinal com a maior precisão

possível, para isto há a descrição e resultados de um método utilizado para a eliminação das distorções harmônicas que ocorrem no sinal de saída, enquanto o controle da amplitude é restringido pela definição e precisão dos equipamentos utilizados, mesmo assim a precisão alcançada com os equipamentos utilizados é da ordem de 0,001%.

As câmaras térmicas disponíveis comercialmente têm características variadas, alguns exemplos são câmaras baseadas em compressores e radiadores, algumas com bastante volume interno, por exemplo, uma fabricada pela Cincinatti Sub-Zero, tem um volume de 680 litros, uma faixa de temperatura de 4°C até 70°C, com variação de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  na temperatura interna em regime, com incerteza de 1°C na temperatura medida. Uma característica dessas câmaras térmicas baseadas em compressores é a possibilidade de uma faixa maior de temperatura, um exemplo desta câmara é a SU 221 da ESPEC, ela possui um volume reduzido, 22 litros, uma faixa de temperatura de -20°C até 150°C, a flutuação na temperatura é de apenas  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ .

As câmaras térmicas baseadas em módulos termoelétricos encontradas normalmente possuem um volume reduzido, assim como a faixa de temperatura em que operam, contudo elas apresentam maior precisão no controle da temperatura, um exemplo disto é a *Constant Climate Chamber* HPP 108 da Memmert, possui volume interno de 108 litros, faixa de 5°C até 70°C, com flutuação menor que  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ , e com variação de  $\pm 0,4^\circ\text{C}$  de uniformidade da temperatura no interior da câmara.

A câmara térmica deste projeto deve alcançar temperaturas de 0°C no limite inferior e próximas a 70°C no limite superior. Ela tem um volume reduzido para que possua uma resposta rápida aos comandos de variação de temperatura e para que a energia necessária para a refrigeração e aquecimento do sistema seja pequena.



É utilizada uma configuração de montagem dos módulos termoelétricos não vista em nenhuma câmara comercial, é feito o estudo das vantagens e desvantagens da configuração em série, cujo objetivo principal é alcançar temperaturas mais baixas.

Os módulos termoelétricos são controlados por controladores do tipo proporcional-integral-derivativos com objetivo de garantir uma maior precisão no controle da temperatura interna, possibilitando erros menores que  $0,2^{\circ}\text{C}$  na temperatura em regime.

O sistema como um todo será automatizado, possibilitando uma maior confiabilidade das medidas, além de proporcionar a repetibilidade, precisão e respostas mais rápidas no controle do sistema.

## 2 PROJETO DO SISTEMA

O sistema proposto para caracterização tem seu conjunto de especificações definido objetivando a aplicação com os sensores de alta-tensão, o que gera características bastante peculiares, como controle de tensões da ordem de 15kV, ao mesmo tempo que as correntes não ultrapassem 2mA.

Outro desafio é a junção da alta tensão com a temperatura, que tem como faixa de variação 0°C a 70°C, acarretando cuidados com a condensação do vapor de água existente na ambiente.

Neste capítulo são fornecidas as noções gerais de como é o sistema, dando ênfase aos blocos e suas funções.

### 2.1. Visão Geral do Sistema

O sistema de forma geral é composto por quatro módulos: um computador, uma placa de interface, o módulo de alta-tensão e a câmara de temperatura, como pode ser observado na Figura 2.1.

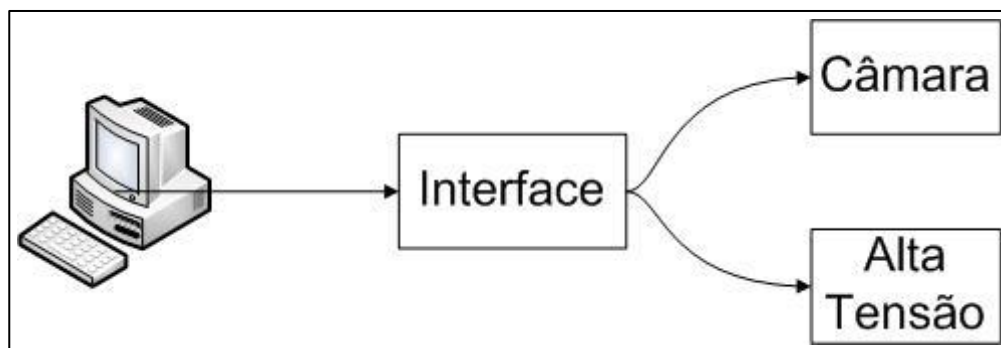


Figura 2.1 – Visão geral do sistema proposto

O controle e observação do sistema são feitos no computador, que roda uma interface gráfica em Labview. Essa interface em Labview disponibiliza os dados

como temperatura e formas de onda na tela do computador, além de realizar os cálculos de controle necessários, como a compensação das harmônicas indesejadas no sinal de alta-tensão.

O computador se comunica com o módulo de interface, por protocolo USB, que repassa os comandos aos outros módulos.

O módulo de interface tem por finalidade fazer a comunicação entre os módulos de alta-tensão e a câmara e o computador, ao mesmo tempo em que isola os circuitos.

A câmara de temperatura tem como finalidade gerar um ambiente no qual a temperatura será controlada, com opção através da inserção de nitrogênio gasoso ter controle sobre a umidade. Há ainda a entrada do sinal de alta-tensão proveniente do módulo de alta-tensão e a comunicação com a interface para o repasse das informações de temperatura e obtenção da temperatura desejada para o interior da câmara.

O módulo de alta-tensão para os testes deste trabalho é composto por vários instrumentos como: gerador de funções, multímetro e analisador de sinais; além de circuitos como: um pré-amplificador e uma ponte divisora de tensão. No Apêndice A há uma proposta de um circuito que execute as ações dos instrumentos comerciais utilizados, dedicadas às necessidades do sistema.

## **2.2. Módulo de Interface**

O módulo de interface encontra-se entre o computador e o módulo câmara, servindo com interface de comunicação entre o computador e um dos módulos.

Como se pode observar na Figura 2.2, que mostra a organização por blocos do módulo de interface, este módulo se comunica com o computador por uma interface USB, dentro do módulo há um circuito integrado que realiza a conversão

de comunicação USB para paralela, chegando ao microcontrolador a comunicação no protocolo paralelo.

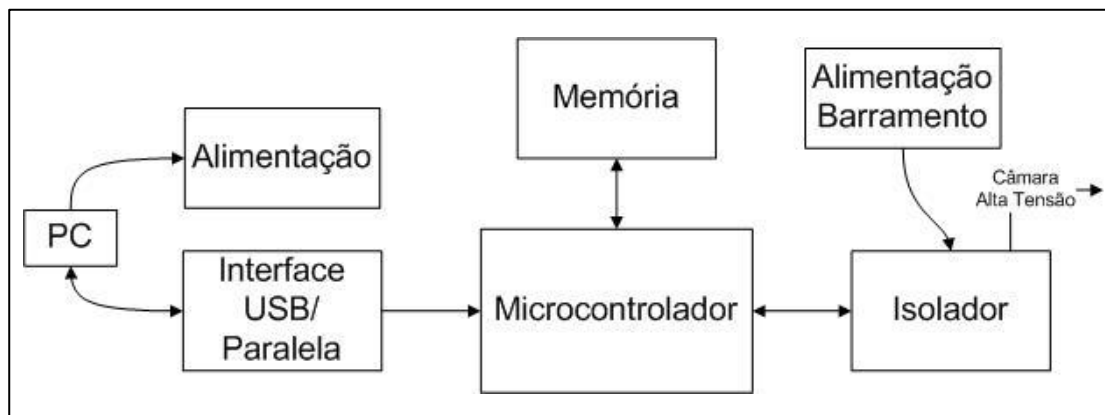


Figura 2.2 – Diagrama de blocos do Módulo de Interface

O computador através da porta USB fornece a energia necessária para alimentar o circuito, e há a opção de também alimentar o barramento RS485, que é utilizado para comunicação entre os módulos. A alimentação do barramento pode ser feita de outra fonte, bastando conectar a fonte externa no circuito e remover os *jumpers* que conectam as duas alimentações.

O módulo conta também com uma memória para que sejam guardados formas de onda mais usadas, como seno, triangular ou qualquer outra, de forma a agilizar o carregamento da forma de onda no módulo de alta-tensão apresentado no Apêndice A, esta memória pode ser utilizada para guardar outros dados oriundos do módulo câmara.

O microcontrolador tem a função de decidir como a comunicação é feita, adquirir o comando do microcomputador e definir se enviará o comando para a câmara, além de receber os dados deste módulo e repassar para o microcomputador e também controlar a memória.

### 2.3. Módulo Câmara

O módulo câmara é o responsável pelo controle da câmara de temperatura, na Figura 2.3 apresenta-se o diagrama de blocos deste módulo.

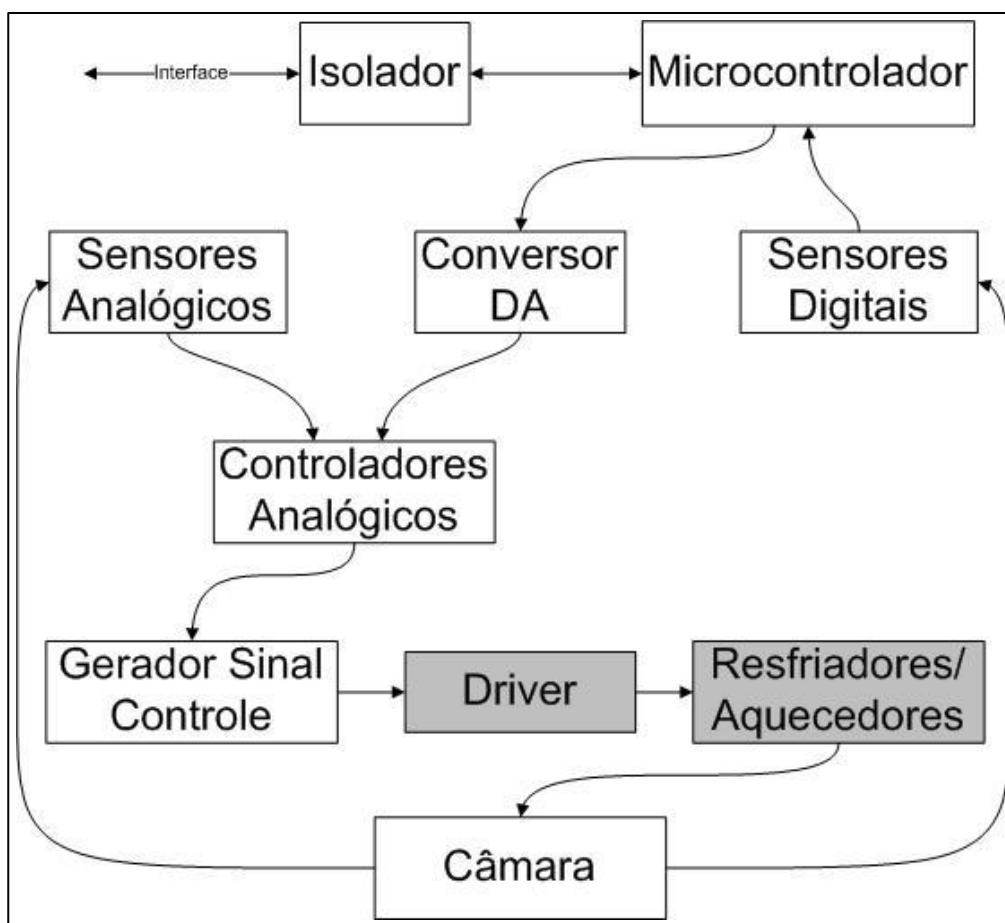


Figura 2.3 – Diagrama de blocos do Módulo Câmara

A comunicação do microcontrolador deste módulo com o módulo de interface passa por um isolador e interface RS485. O microcontrolador tem como funções a comunicação, a aquisição de dados dos três sensores digitais e o controle do conversor DA (digital-analógico – este conversor recebe dados digitais e transforma-os em um nível de tensão analógica com base em uma tensão de referência).

A função do conversor DA é gerar um nível de tensão, que é proporcional a temperatura que se deseja obter no interior da câmara térmica, este nível é comparado ao sinal dos sensores analógicos pelos controladores analógicos.

Os controladores analógicos geram dois sinais de saída, que precisam ser condicionados para serem utilizados nos elementos que servem para esquentar e esfriar a câmara, que são módulos termoeletrônicos. Os módulos termoeletrônicos necessitam de um controle diferenciado por causa da potência que eles consomem para isto há um gerador de sinal de controle e um circuito de acionamento.

O circuito de acionamento consiste na interface eletrônica entre o sinal de controle e os atuadores, de forma que exista uma isolação entre a parte de potência e de controle do circuito.

Os elementos com fundo branco na Figura 2.3 são alimentados por uma fonte de baixa potência, e os elementos com fundo cinza por outra fonte de alta potência, já que estes demandam uma potência maior da fonte e é preferível isolar eletricamente estes blocos do circuito.

#### **2.4. Módulo de Alta-tensão**

O módulo de alta-tensão utilizado nos testes consiste em uma série de instrumentos e circuitos dedicados a geração e análise de uma onda arbitrária de alta-tensão. O Apêndice A apresenta a proposta de um circuito dedicado a esta tarefa.

Para este os testes deste trabalho foi utilizada a configuração apresentada na Figura 2.4, que conta com vários equipamentos de laboratório como: gerador de função, analisador de sinais e multímetro.

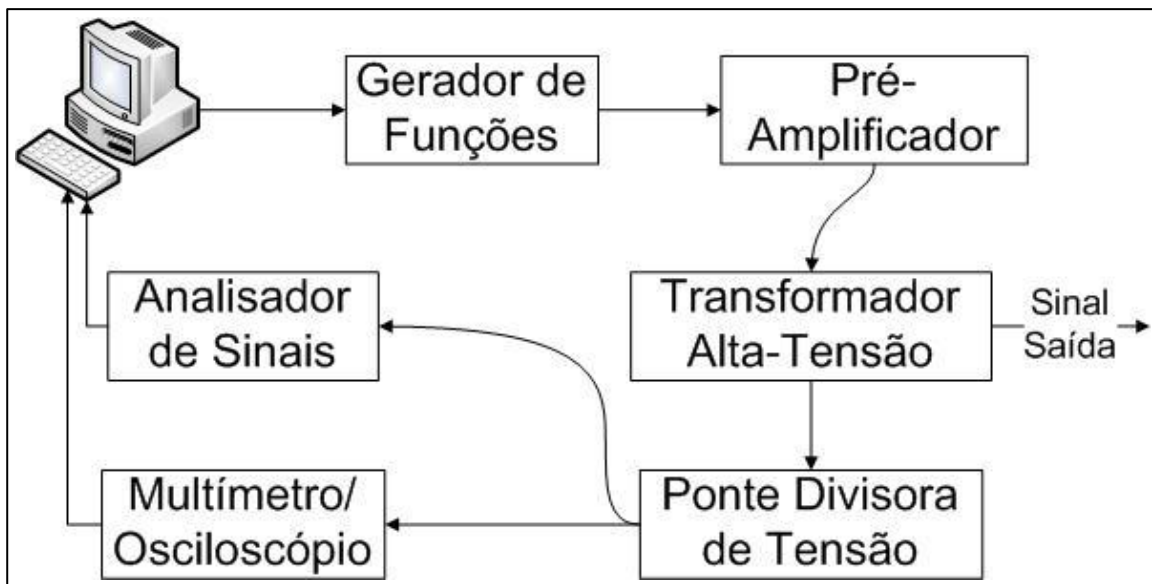


Figura 2.4 – Diagrama de blocos do Módulo de Alta-Tensão

O computador controla o gerador de funções, que na sua saída tem uma forma de onda que é pré-amplificada por um circuito amplificador. Após essa pré-amplificação a forma de onda irá para o transformador de alta-tensão.

A saída de alta-tensão é amostrada através de uma ponte divisora resistiva montada para esta finalidade com componentes especiais para alta-tensão. No fim da ponte divisora o sinal já atenuado é adquirido pelo analisador de sinais e pelo multímetro ou osciloscópio.

O analisador de sinais tem a função de verificar se o sinal possui alguma distorção e mandar esta informação ao computador que corrige esta distorção modificando a forma de onda enviada ao gerador de funções.

Um multímetro ou osciloscópio é utilizado para adquirir o valor da amplitude do sinal, para ser comparado pelo software no computador com o valor desejado e caso necessário sejam feitas alterações.

### 3 PROJETO DOS BLOCOS DO SISTEMA

No capítulo anterior o sistema é descrito na forma de blocos, dando ênfase as funcionalidades dos módulos, sem entrar em detalhes do projeto eletrônico e suas características básicas.

Neste capítulo são descritos os circuitos eletrônicos, justificando os componentes utilizados e a forma como são utilizados. No subcapítulo referente à câmara de temperatura são abordados os aspectos de construção além da parte de eletrônica.

### 3.1. O Módulo de Interface

O circuito referente a este módulo é bem simples, já que o foco deste módulo é garantir a comunicação e isolamento elétrica entre os módulos e o computador.

Este módulo se comunica com o computador através de um cabo USB, um circuito integrado, o FT232RL da FTDI, é responsável por alterar o formato dos dados para comunicação paralela, com um barramento de oito bits entre o FT232RL e o microcontrolador PIC.

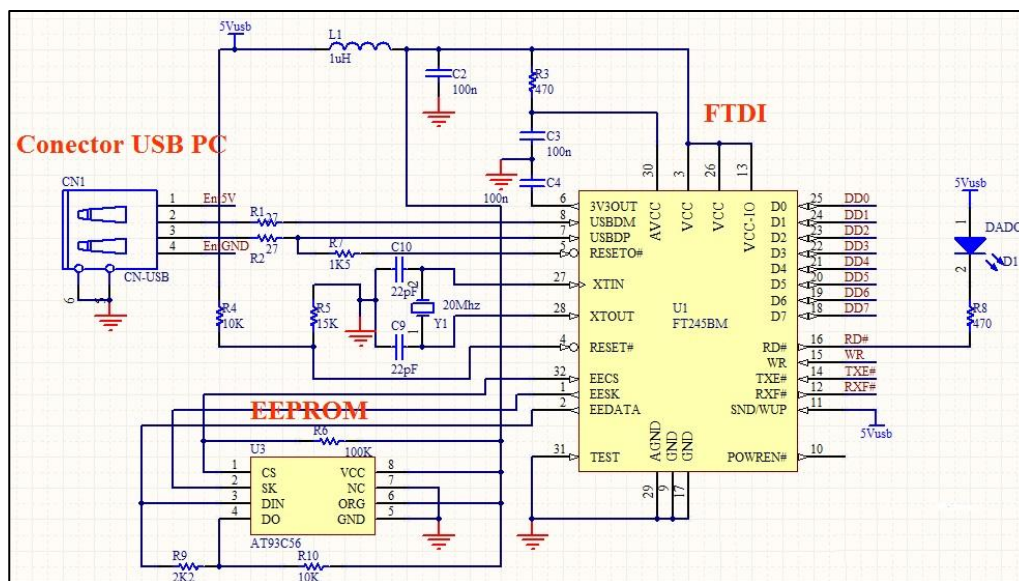


Figura 3.1 – Parte do circuito que engloba o FTDI, EEPROM e conector USB.



Ligado ao FT285BM há uma EEPROM para inserir uma identificação do circuito, quando reconhecido pelo computador através da USB.

O microcontrolador utilizado neste módulo é um PIC16F873A, com 22 portas de entrada/saída de dados. A opção por este modelo se deu pelo seu custo, tamanho da memória de programação e número de portas, para o módulo de interface o número de portas é o fator importante, para o módulo câmara o tamanho da memória de programação que é quase totalmente utilizada foi o fator preponderante. O PIC controla o acesso a uma memória de 16 Mbits com interface SPI, a AT45DB161D.

O PIC tem algumas portas ligadas a interface do FT245BM, além do barramento de 8 bits, são 4 portas de controle e três portas devotadas a comunicação RS485 com os outros módulos, as portas restantes controlam a memória.

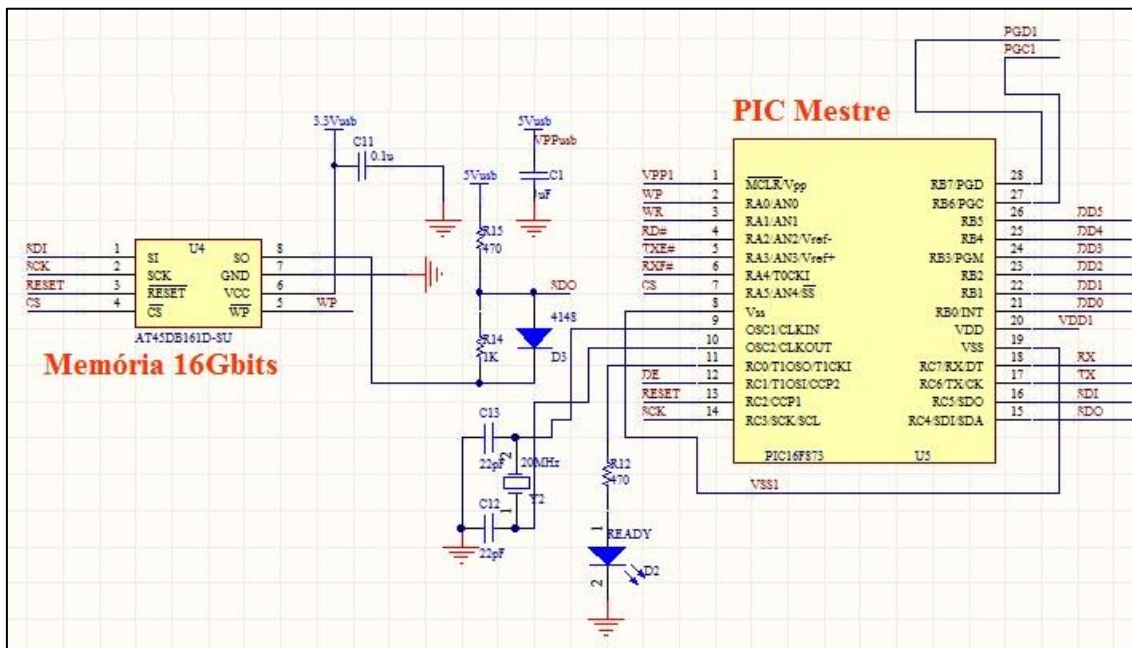


Figura 3.2 – Parte do circuito que engloba o PIC e a Memória.

A maior parte dos componentes é SMD, o que implica em um espaço menor ocupado pelos componentes, mas gera alguns problemas, como o

microcontrolador que não pode ser retirado da placa para efetuar a gravação do programa nele, assim foi utilizado a gravação *In Circuit Serial Programming* ou simplesmente ICSP.

A gravação ICSP consiste em colocar o cabo do gravador diretamente ligado ao circuito no qual se encontra o PIC, isto com uma barra composta por cinco pinos, sendo eles correspondentes ao: VPP, VDD, GND, PGC, PGD; em sequência dois níveis de alimentação, o terra, *clock* e dados para efetuar a gravação.

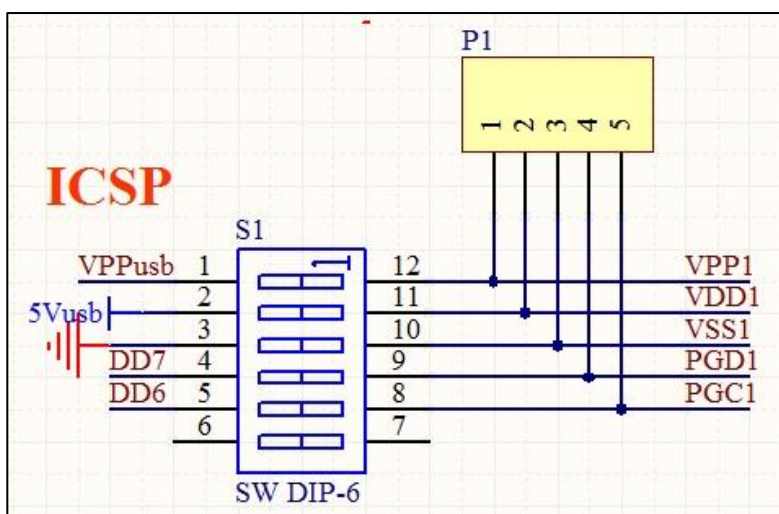


Figura 3.3 – Parte do circuito que engloba a gravação ICSP.

Sobre a parte de alimentação há pouco a se comentar, pois o nível de +5V é retirado da porta USB e para os elementos que utilizam +3.3V há um regulador de tensão TLV2217-33KTPR.

A parte de comunicação é composta por um isolador galvânico ADM243, que também transforma os dados que estavam no formato de serial para RS485. Como se observa na Figura 3.4 é no módulo de interface que existe a ligação para a alimentação externa do barramento RS485 que liga os módulos, ou então a utilização da alimentação que vem da USB.

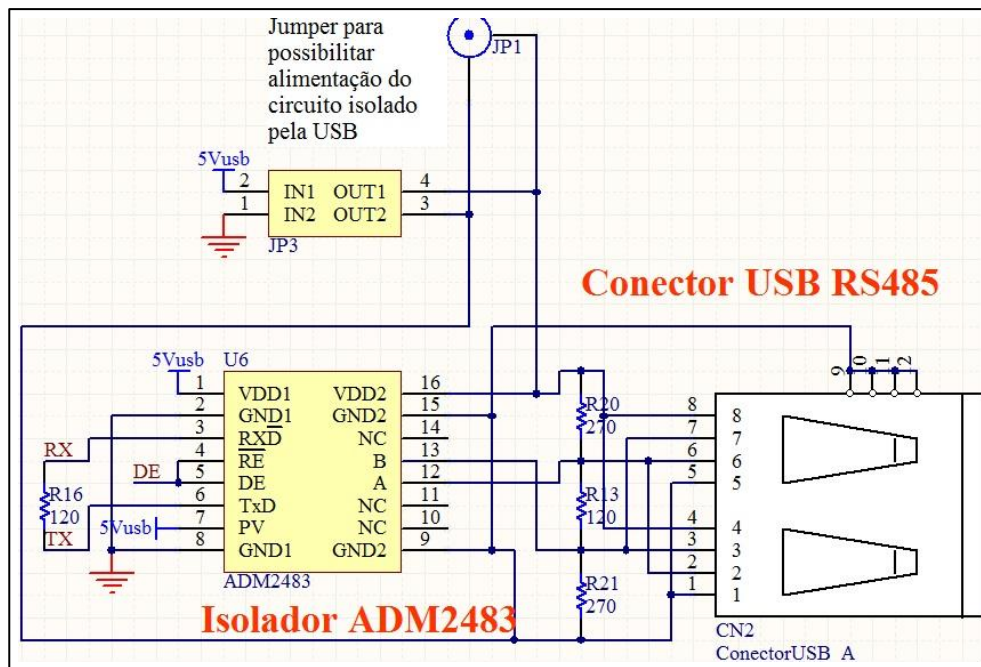


Figura 3.4 – Parte do circuito responsável pelo barramento de comunicação RS485.

## 3.2. O Módulo Câmara

Este módulo apresenta uma diferença em relação aos outros dois módulos, para a câmara há além do projeto eletrônico a parte mecânica, com detalhes da construção e materiais usados, já que isto é uma parte crítica para os resultados.

### 3.2.1. Parte Eletrônica

A parte eletrônica do módulo da câmara é constituída basicamente por três circuitos: o digital, o analógico e o de potência. O circuito digital tem a função de comunicar-se com o módulo de interface, recebendo o valor desejado de temperatura interna e enviando os dados recebidos dos sensores. A função do circuito analógico é o controle dos atuadores, sendo que possui sensores analógicos para auxiliar no controle. Na parte de potência se encontram os atuadores e os componentes necessários ao funcionamento deles. Os circuitos têm ligações entre eles, como o sinal de setpoint da temperatura interna originado na parte digital e enviado a analógica, ou então os sinais PWM que passam da parte analógica para a de potência.

### 3.2.1.1. Circuito digital

O circuito digital é centrado no microcontrolador PIC16F873A, que como o microcontrolador do módulo de interface é gravado usando ICSP, como é apresentado na Figura 3.5.

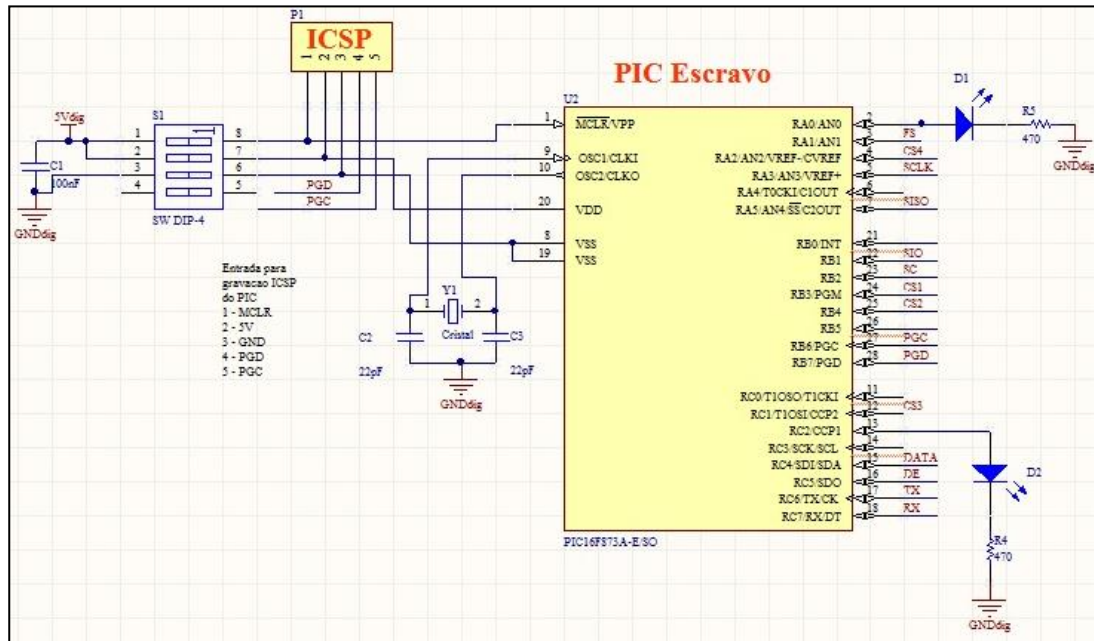


Figura 3.5 – Diagrama esquemático da parte do circuito contendo o PIC16F873A.

Ligado ao microcontrolador há os sensores de temperatura LM95071, o sensor de temperatura e umidade SHT15 e o conversor digital-analógico TLV5616. Os sensores de temperatura LM95071 se comunicam com o microcontrolador através do protocolo SPI, os dados de temperatura têm 13 bits mais um bit de sinal e são bastante rápidos. O sensor de temperatura e umidade SHT15 também se comunica usando SPI, a temperatura é dada com 14 bits e a umidade com 12 bits, esse sensor demora cerca de 300 ms para responder a requisição de uma medida e caso seja feita a requisição de mais de uma medida por segundo ele aquece até 2°C, interferindo na própria medida. Esta é a razão pela qual se utiliza um LM95071 para obter a temperatura interna, e o SHT15 apenas mede a umidade. A

Figura 3.6 mostra o diagrama esquemático dos sensores com as ligações para o microcontrolador.

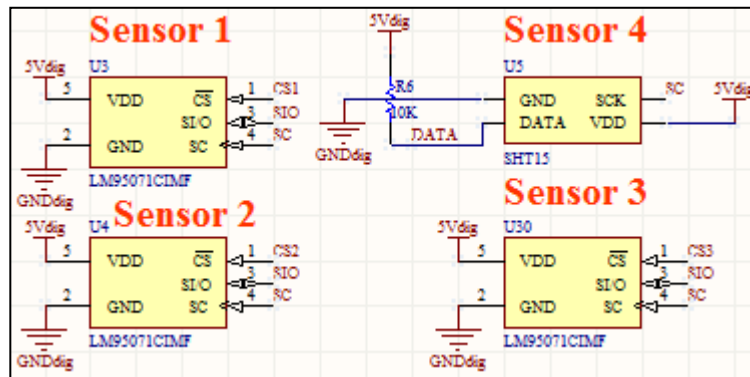


Figura 3.6 – Parte do circuito contendo os sensores.

O conversor digital-analógico utilizado tem 12 bits de resolução, controlado pelo microcontrolador através de protocolo SPI, possui uma tensão de referência de 2,5 volts gerada pelo AD780. No conversor digital-analógico é que se define a temperatura desejada, foi utilizado a escala 32mV/°C, possibilitando uma faixa de temperatura que vai de -23,2°C até 126,8°C, bem maior do que a faixa utilizada neste projeto, contudo é conveniente deixar essa margem expandida para testes e melhorias no projeto.

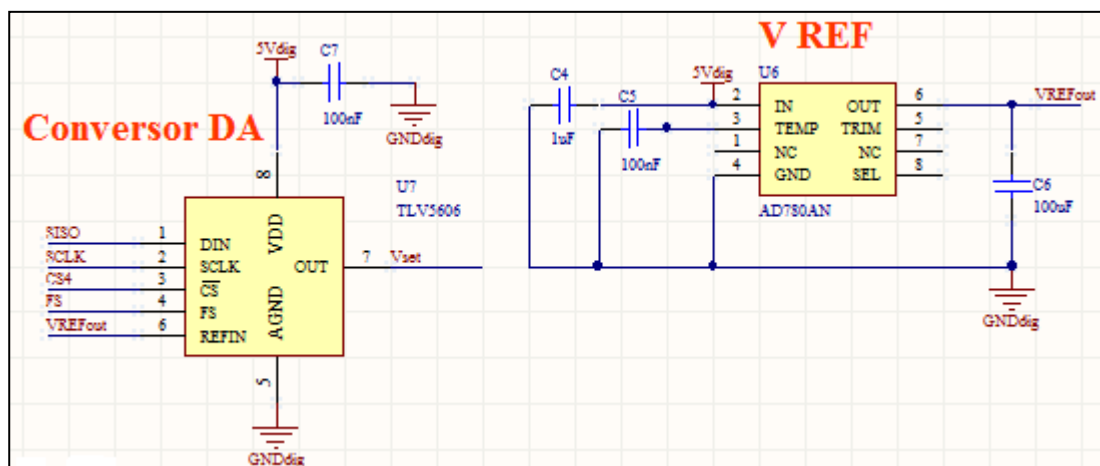


Figura 3.7 – Parte do circuito com o conversor digital-analógico e tensão de referência.

[illegible]

### 3.2.1.2. Circuito Analógico

Os sensores para obtenção da temperatura no bloco intermediário e no bloco do dissipador são dois NTC, *Negative Temperature Coefficient*, que é um termistor cuja resistência diminui à medida que a temperatura aumenta. Houve a necessidade de linearizar a resposta dele à variação da temperatura, o que foi feito utilizando um divisor de tensão resistivo, a curva de linearização usando um resistor de  $1\text{k}\Omega$  é apresentada na Figura 3.9.



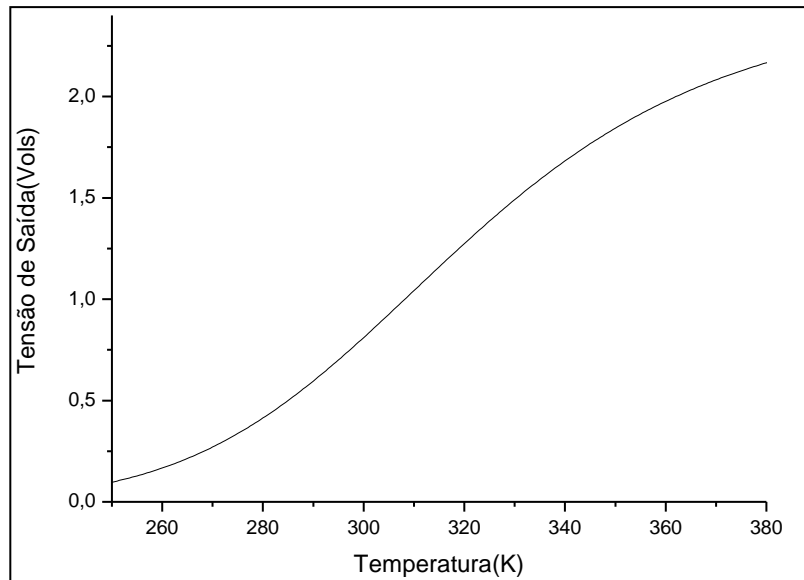


Figura 3.9 – Gráfico com a resposta do divisor de tensão para o NTC.

Os sinais oriundos dos NTC são ajustados para a escala de 32 mV/°C que foi definida no conversor digital-analógico, para ser a escala padrão no circuito inteiro. O ajuste é feito utilizando dois amplificadores operacionais, no primeiro soma-se uma tensão de *offset* e é dado um ganho, e no segundo o sinal é invertido, o diagrama esquemático desta parte do circuito é apresentado na Figura 3.10.

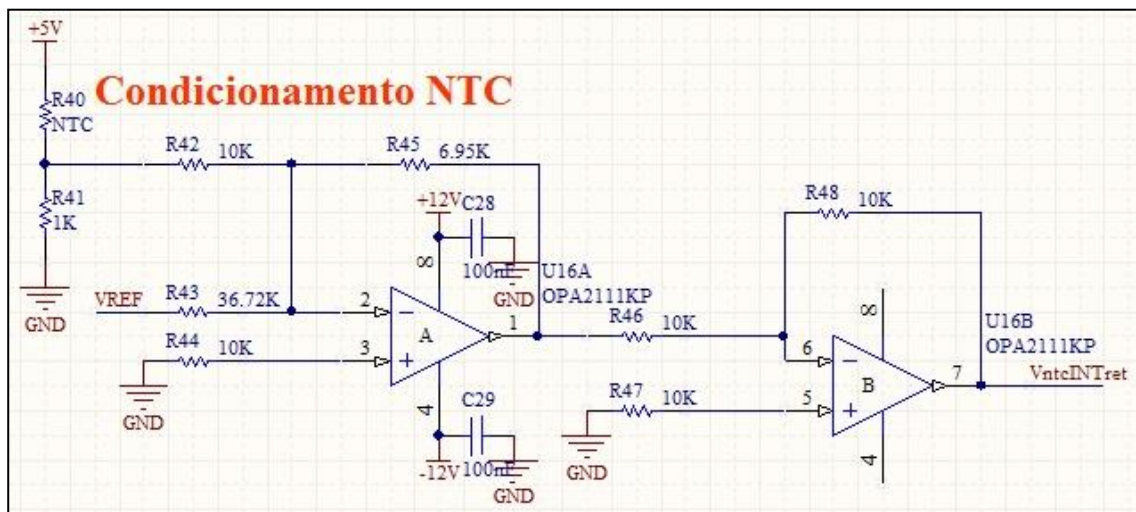


Figura 3.10 – Parte do circuito de condicionamento do sinal do NTC.

A temperatura interna é obtida através do AD590, um sensor que fornece um sinal na forma de corrente, no fator de  $1\mu\text{A}/^\circ\text{C}$ , o condicionamento dele para a escala de  $32\text{ mV}/^\circ\text{C}$  é feito passando essa corrente por um resistor de precisão de  $10\text{K}\Omega$ , somando-se à tensão obtida um *offset* e dando um ganho na soma, como apresenta a Figura 3.11.

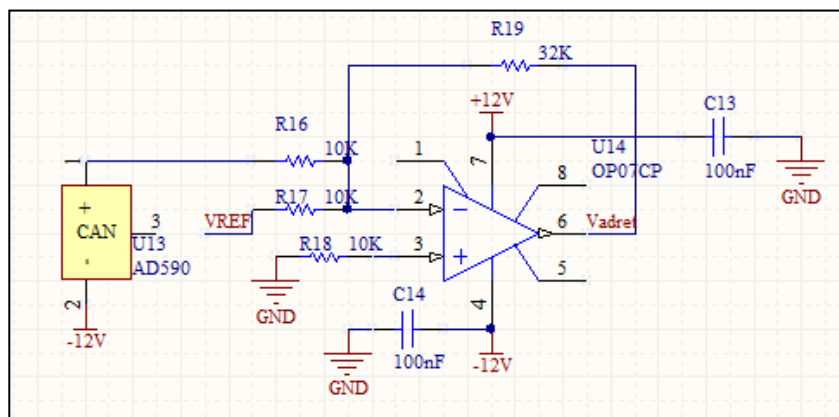


Figura 3.11 – Parte do circuito de condicionamento do AD590.

Os sinais obtidos após o condicionamento das leituras dos sensores são utilizados no controle dos módulos termoeletrônicos, esse controle é do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Há várias configurações para o controle PID com componentes eletrônicos discretos, a forma escolhida é semelhante a utilizada por AVILEZ (1978) e por BRADLEY (1990), composta por quatro amplificadores operacionais, sendo eles dedicados a cada uma das seguintes funções: parte proporcional, a parte integral, a parte derivativa e o último utilizado como somador dos sinais provenientes dos três outros amplificadores operacionais.

A Figura 3.12 apresenta o circuito PID utilizado com um amplificador de erro na entrada, Figura 3.13, sem haver a amplificação do sinal de erro, que neste caso é a diferença entre o sinal medido no interior da câmara com o sinal de referência vindo do conversor digital analógico, apenas a diferença entre os dois.



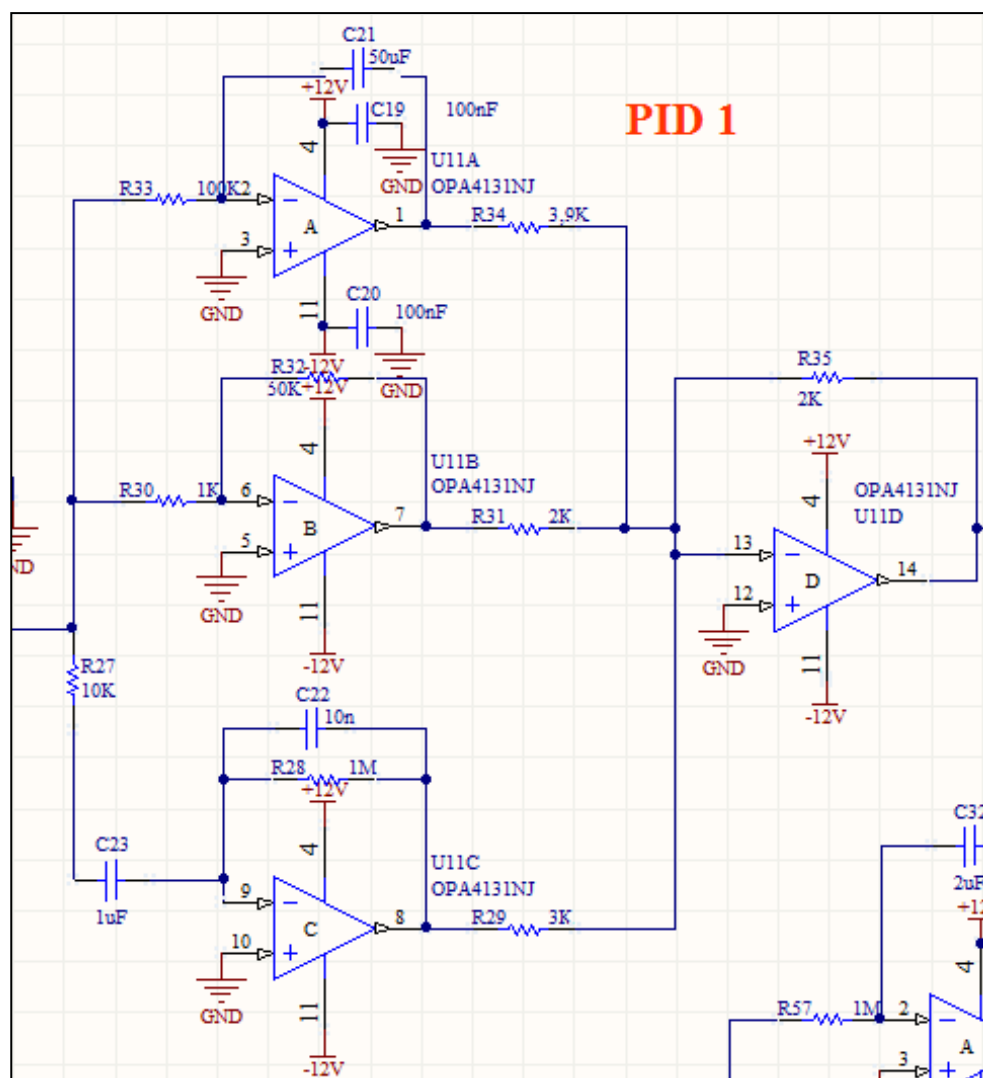


Figura 3.12 – Parte do circuito com o controle PID e amplificador de erro.

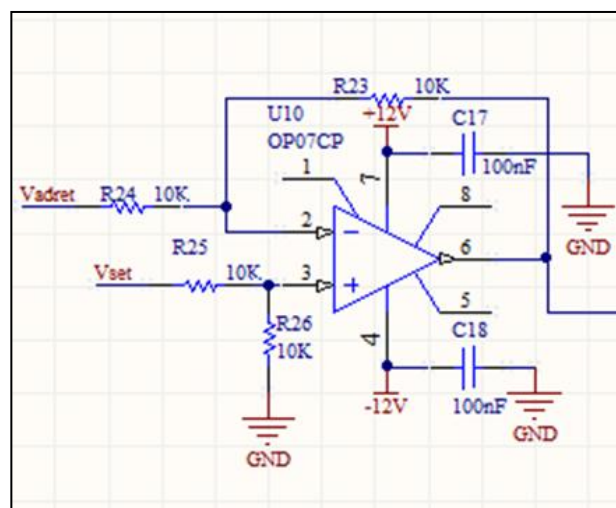


Figura 3.13 – Amplificador de erro na entrada do controlador PID.



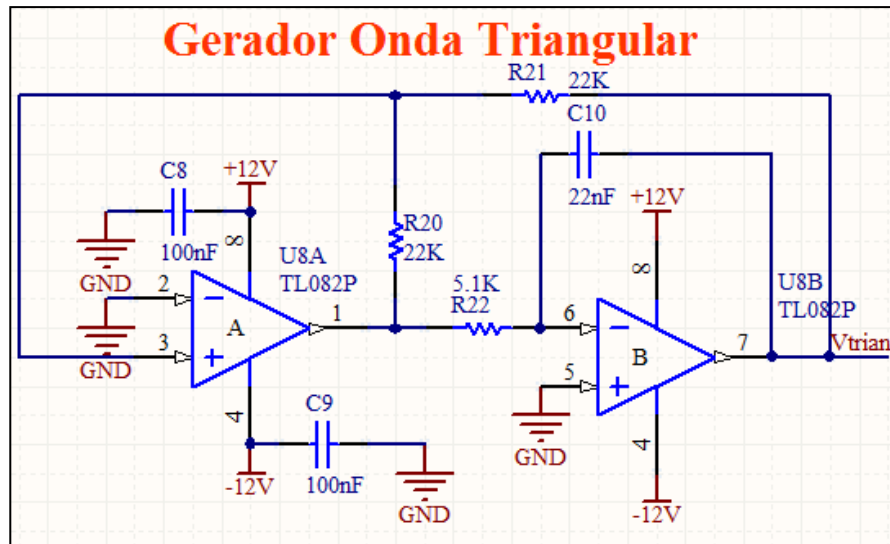


Figura 3.15 – Parte do circuito que gera a onda triangular.

O sinal PWM é obtido através da comparação do sinal de controle e da onda triangular, quando o sinal de controle que é um nível DC cruza com a onda triangular o comparador muda sua saída para nível lógico baixo (0 V) ou alto (5 V), dependendo se a onda triangular tem o valor maior ou menor do que o sinal de controle, para isto é utilizado um comparador rápido e de precisão.

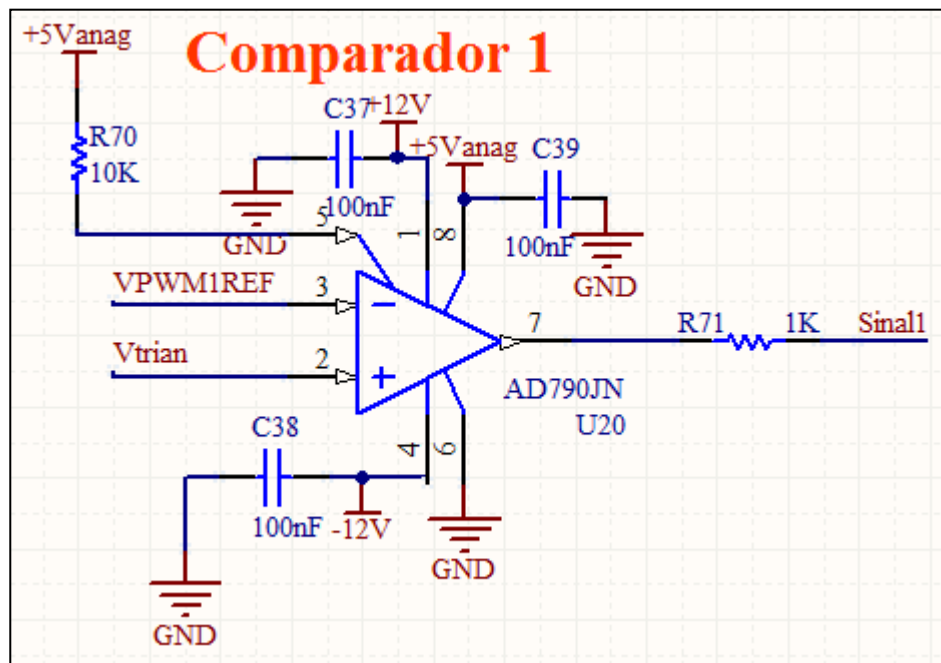


Figura 3.16 – Parte do circuito com o comparador.

### 3.2.1.3. Circuito de potência

Ao circuito de potência chegam dois sinais vindos do circuito analógico, a saída dos dois comparadores, que são dois sinais PWM, um para cada módulo termoeletrico. Os dois circuitos são isolados eletricamente utilizando-se dois optoisoladores, com o intuito de separar os controladores PID do ruído gerado pelo chaveamento na parte de potência.

O sinal PWM de +5 Volts vindo do circuito analógico sai do optoisolador com nível lógico alto de +12 Volts, só que com uma corrente de saída muito baixa. Um *driver* é posto na saída do optoisolador para além de garantir a corrente necessária para o chaveamento dos MOSFETs, prover um sinal complementar que é utilizado na ponte H.

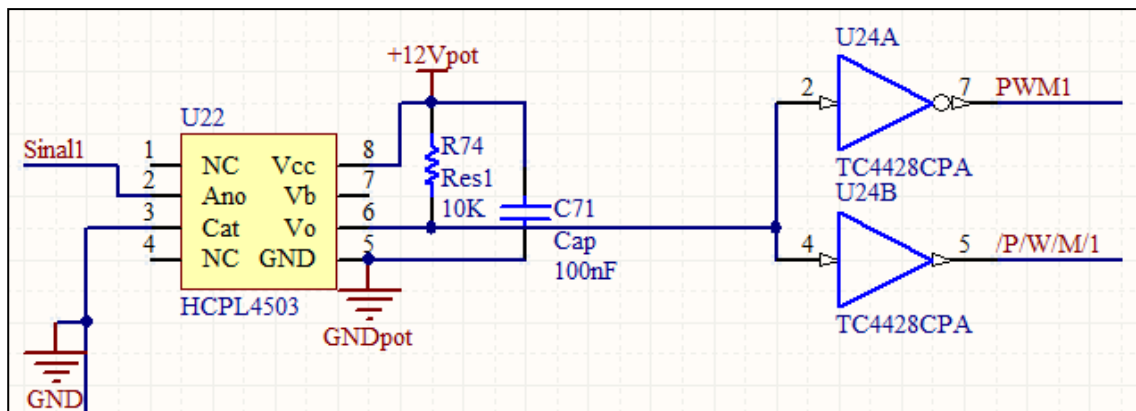


Figura 3.17 – Parte do circuito com o optoisolador e o *driver* de potência.

Para o acionamento dos módulos termoeletricos é utilizado uma ponte H, que possibilita a passagem de corrente nos dois sentidos, o que torna o TEM capaz de esquentar e esfriar. A lógica de funcionamento da ponte H consiste em sempre ter um par de chaves conduzindo, que neste caso são MOSFETs, na Figura 3.18 mostra-se o circuito utilizado, cada lado possui o sinal inverso do outro, assim quando Q1 estiver conduzindo do outro lado Q4 estará também conduzindo, acarretando uma tensão um pouco abaixo de +VCC entre J1 e J2. Caso Q2 esteja

conduzindo, nem Q1 nem Q4 podem conduzir, e sim Q3 induzindo uma tensão um pouco maior que  $-V_{CC}$  entre J1 e J2.

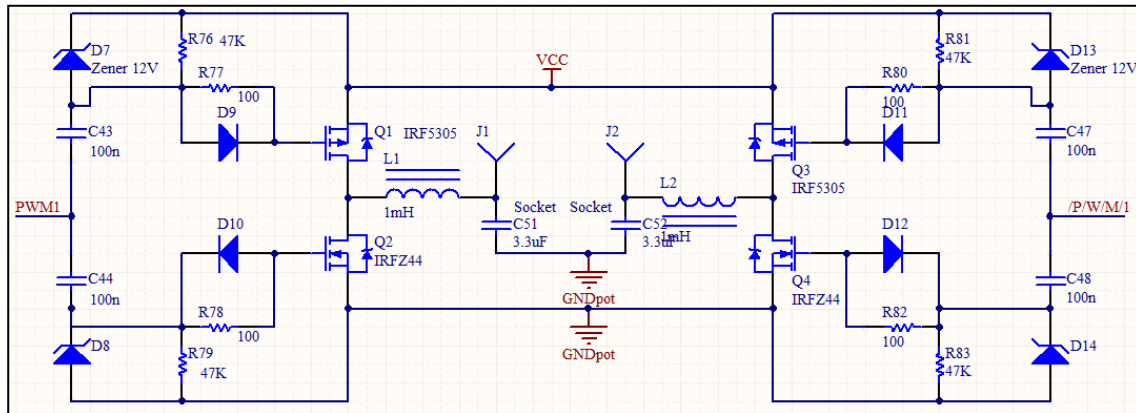


Figura 3.18 – Esquemático da ponte H utilizada para acionar os TEM.

#### 3.2.1.4. Circuitos diversos

Há dois circuitos que precisam ser citados, um de alimentação e a proposta de um circuito para elevar ainda mais a temperatura interna utilizando transistores de potência (TIPs).

A fonte de alimentação baseia-se na retificação da saída de um transformador, no Apêndice B há o circuito completo, tem duas partes, uma que tem uma ponte retificadora completa que depois é regulada para +12V, -12V e +5V. Inicialmente a parte de potência seria alimentada com +20V e -20V, contudo o circuito que seria utilizado, o equivalente a um lado da ponte H, juntamente com a ponte retificadora completa trazia problemas, porque no momento do chaveamento não havia por onde a corrente escoar por causa dos diodos e então havia picos de tensão nos capacitores de filtragem que fazia-os queimar. A solução encontrada foi além de usar a ponte H completa, não usar mais uma ponte retificadora, mas usar o retificador da Figura 3.19, composto por dois diodos, obtendo-se apenas um sinal de +20V.

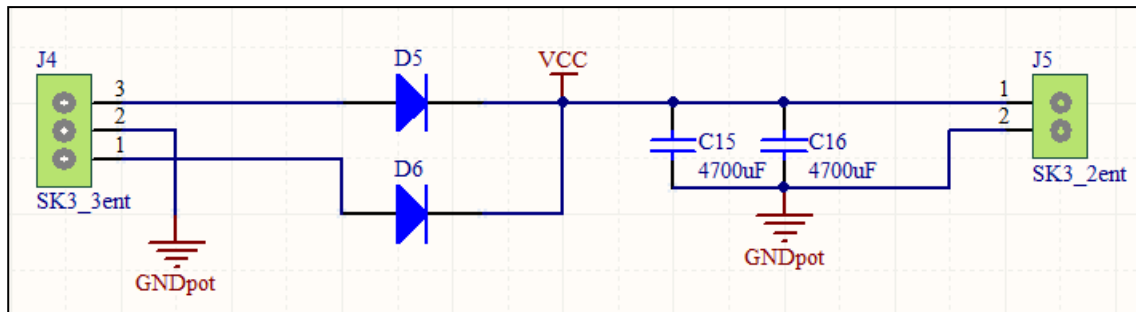


Figura 3.19 – Retificador utilizado na alimentação da parte de potência.

A proposta do circuito para aumentar a temperatura interna para além dos 80°C que os módulos termoeletrônicos possibilitam, está completa no Apêndice B. Este circuito consiste em um NTC para obtenção da temperatura próxima aos atuadores que são transistores de potência (TIPs), que são utilizados para esquentar, um controlador PID com um sinal DC de saída que se liga à base dos TIPs induzindo-os a condução, e utiliza-se o fato deles gerarem até 15 Watts de potência térmica cada um durante a condução para aquecer a câmara.

### 3.2.2. Parte Mecânica

O tamanho da câmara, a isolamento e os materiais são determinantes na estimativa da potência necessária para esfriar/esquentar a câmara. A câmara tem dimensões externas de 300 mm de largura, 240 mm de profundidade e 120 mm de altura. A isolamento possui cerca de 30 mm e é de espuma elastomérica, que possui condutividade térmica de 0,037 W/(m·K) à 20°C. Como essa isolamento, o volume interno útil da câmara tem as seguintes dimensões: 240 mm de largura, 180 mm de profundidade e 60 mm de altura, totalizando 2,592 litros.

O fabricante dos módulos termoeletrônicos (Laird Technologies) fornece um software que calcula a potência necessária para resfriar a câmara, colocando os dados do projeto no software AZTEC, a potência necessária em regime para a câmara resfriar é de 10,58 Watts, isso contando com 1 Watt gerado pelo ventilador interno.

São utilizados dois módulos termoeétricos (TEM) em série, com o objetivo de reduzir a diferença de temperatura entre as placas cerâmicas deles, possibilitando assim uma maior potência transportada. A utilização de módulos termoeétricos é uma alternativa ao uso de compressores e radiadores para o resfriamento, há vantagens como o tamanho reduzido dos módulos termoeétricos e a possibilidade do mesmo atuador resfriar e aquecer invertendo o sentido da corrente elétrica.

**Power Dissipation Worksheet**

File Units MELCOR Help

**Select Configuration**

- ☐ Volume Cooling (Passive Load in Insulating Container)
- ☒ Volume Cooling (Active Load in Insulating Container)
- ☐ Device Cooling (Insulated Device or Cold Plate)
- ☐ Device Cooling (Uninsulated Device or Cold Plate)

**Container Dimensions**

☒ Box ☐ Cylinder

Length: 300 (mm)  
Width (W): 240 (mm)  
Height (H): 120 (mm)

**Cooling Requirements**

Ambient Temp (Ta): 30,00 (°C)  
Internal Temp (Ti): 0 (°C)  
Active Load (Volts x Amps): 1 (W)

**Insulation Properties**

Thickness (t): 30 (mm)  
Other Insulation: [Dropdown]  
Thermal Conductivity: 0,037 (W/m-K)

**Device Properties**

Aluminum [Dropdown]  
Density: 2710,0 (kg/m³)  
Specific Heat: 900,0 (J/kg-K)

**Requirement for Heat Pumped from Cold Side**

Passive Heat Load (Watts): 9,58  
Active Heat Load (Watts): 1,00  
Steady State Heat Load @ Tc (Watts): 10,58  
Qc Requirement (Watts): 10,58

Clear Requirements Print Return to TEC Selection

Figura 3.20 – Janela do programa AZTEC.

A câmara é constituída por duas partes, unidas por um fecho central e, para centralizar as peças de alumínio internas são utilizadas duas peças de teflon usinadas para este fim.

A Figura 3.21 é uma foto da câmara, na qual é apresentado o interior dela, com os sensores, ventilador e dissipador presos na parte superior. Na parte inferior podem ser vistas a peça de teflon e a borracha de vedação deslocadas para permitir a

visualização da espuma elastomérica empregada na isolamento. Há no interior da câmara um ventidor com o objetivo de fazer o ar circular dentro da câmara para não haver gradientes de temperatura muito grandes.

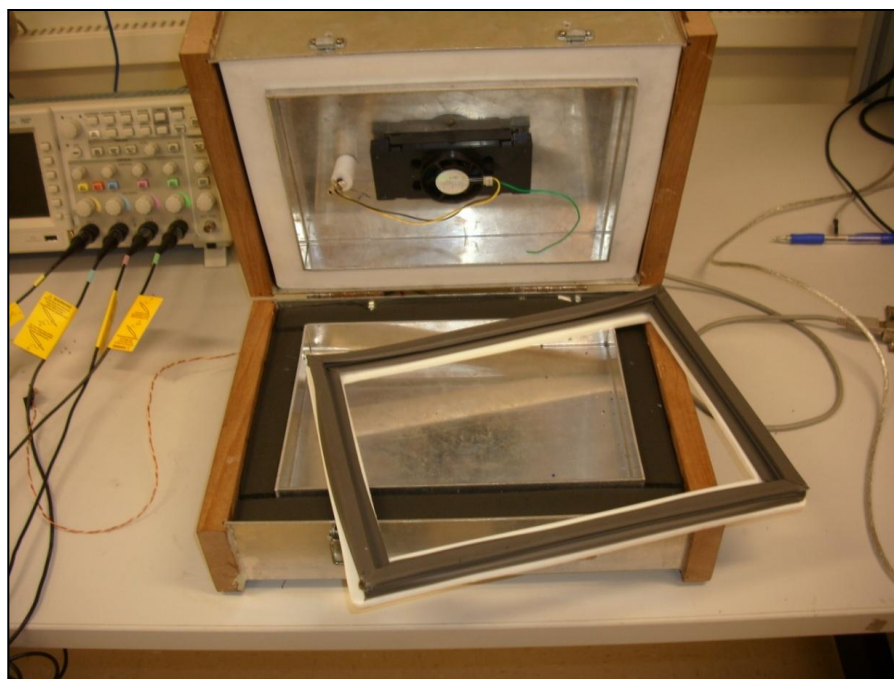


Figura 3.21 – Foto da câmara com vista do interior.

Na Figura 3.22 é apresentada a montagem dos módulos termoeletrônicos, a posição dos sensores e dos blocos de cobre.

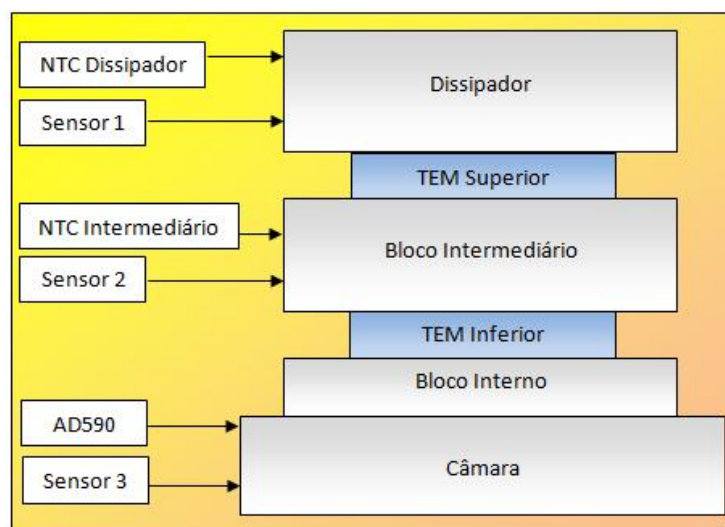


Figura 3.22 – Diagrama da montagem dos TEM.



A parte crítica do uso dos módulos termoeletrônicos é a dissipação das potências transportadas e geradas para o transporte de calor. Houve a necessidade de utilizar um dissipador capaz de retirar o calor do lado quente do TEM superior. De acordo com Page M, (2009), para uma carga de 125W o dissipador a ser utilizado fica 15°C acima da temperatura ambiente.

A foto da montagem dos módulos termoeletrônicos, blocos de cobre e do dissipador é apresentada na Figura 3.23, nesta montagem ainda não há o isolante que é posto ao redor dos TEM e dos blocos de cobre.

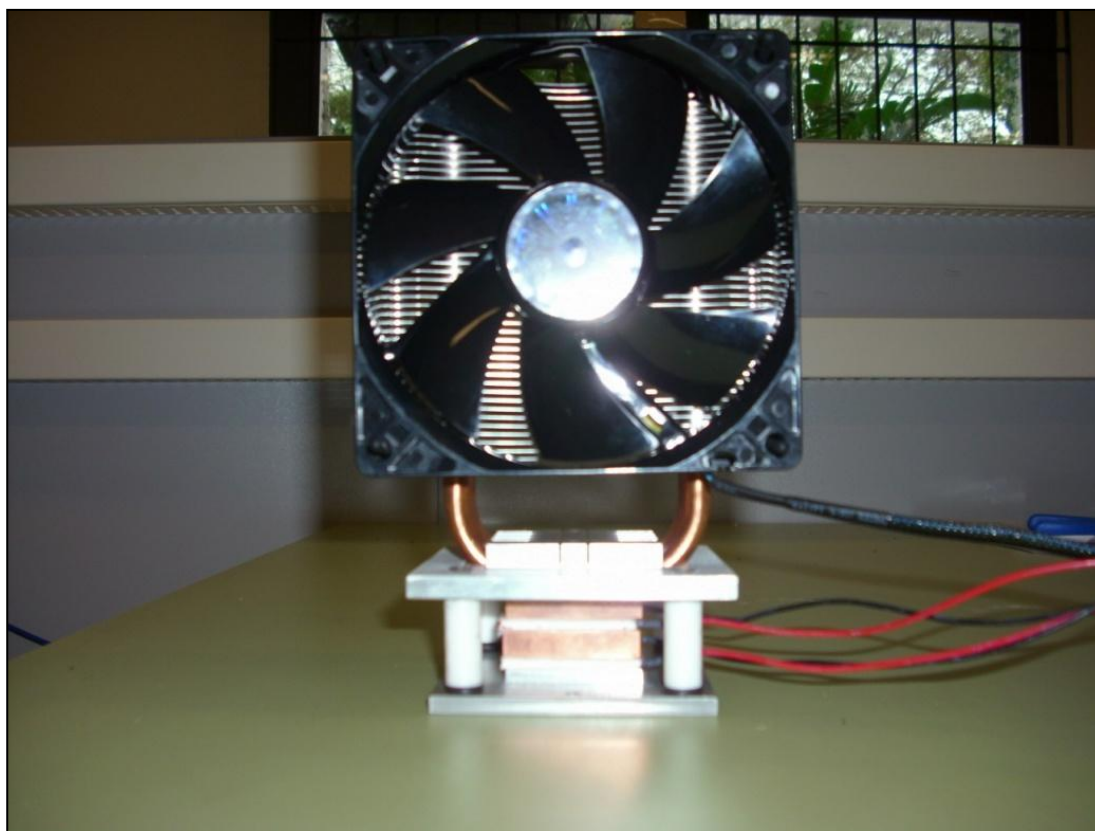


Figura 3.23 – Foto da montagem dos TEM, blocos de cobre e dissipador sem o isolante.

A montagem final da câmara é feita prendendo na parede interna da câmara térmica o módulo composto pelos TEM, blocos de cobre, dissipador, isolante e sensores e, por fim, colocando-se o dissipador interno e o ventilador. Na Figura

3.24 pode ser vista uma fotografia da câmara térmica totalmente montada, e com a placa do circuito de controle e medida de temperatura já instalada na parte superior da câmara.



Figura 3.24 – Foto da câmara montada.

### 3.3. Módulo de Alta-Tensão

O módulo de alta-tensão utilizado faz uso de instrumentos de laboratório como: um gerador de funções, um analisador de sinais e um multímetro. Há alguns circuitos anexos como o pré-amplificador e a ponte divisora resistiva, no Apêndice A é apresentada uma proposta para substituição dos instrumentos por um circuito dedicado a geração e obtenção dos sinais.

A forma de onda desejada é gerada no computador, esta onda deve ser senoidal ou formada por senóides com frequências entre 60Hz e 2kHz, que são as

especificações do transformador de alta tensão. O *software* transmite os dados da onda, com 14 bits de resolução para cada ponto, para o gerador de funções via GPIB (o gerador utilizado foi Agilent 33220A). Pelo *software* é possível ajustar a frequência e a amplitude da onda, o sinal gerado é então pré-amplificado, utilizando o circuito apresentado na Figura 3.25.

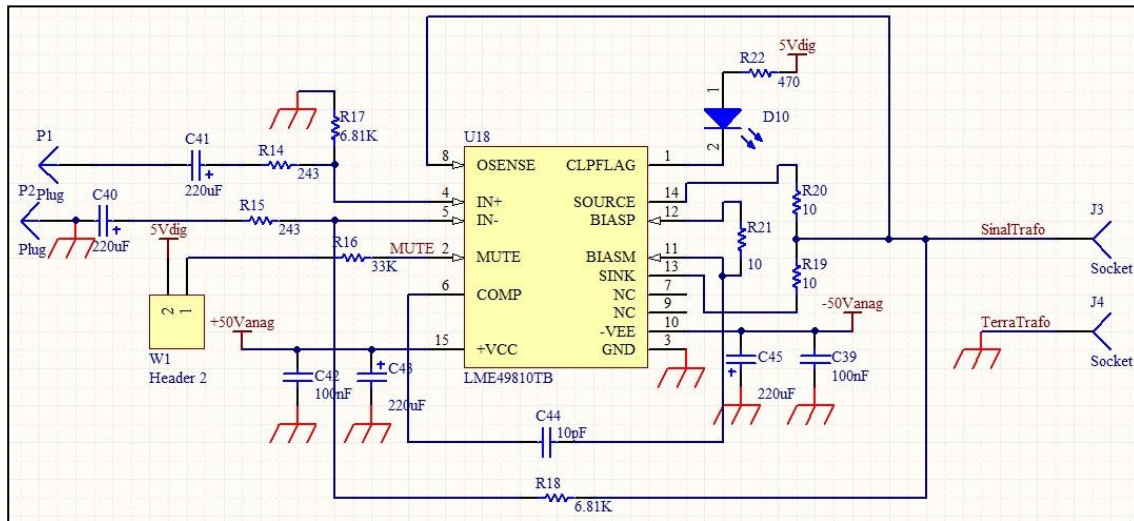


Figura 3.25 – Circuito pré-amplificador do sinal para alta tensão.

O circuito de pré-amplificação consiste em um amplificador de áudio de baixa distorção, usando um LME49810, a utilização de um amplificador de áudio é conveniente devido à faixa de frequência desejada. O pré-amplificador eleva o sinal que antes era de 1,526 Vpp, para até 100 Vpp, que é a tensão especificada para a entrada do transformador de alta-tensão. A Figura 3.26 apresenta a foto do transformador utilizado para a amplificação do sinal até a tensão de 15 kV.

O transformador eleva o sinal para 15 kV de pico, neste processo há a adição de distorções no sinal, na saída do transformador há além da saída para utilização, uma saída para a amostragem do sinal que é feita através de uma ponte divisora resistiva, que é feita usando 20 resistores de 3,3 M $\Omega$  especiais para alta-tensão, sendo que cada um suporta até 2,5 kVrms entre os seus terminais.

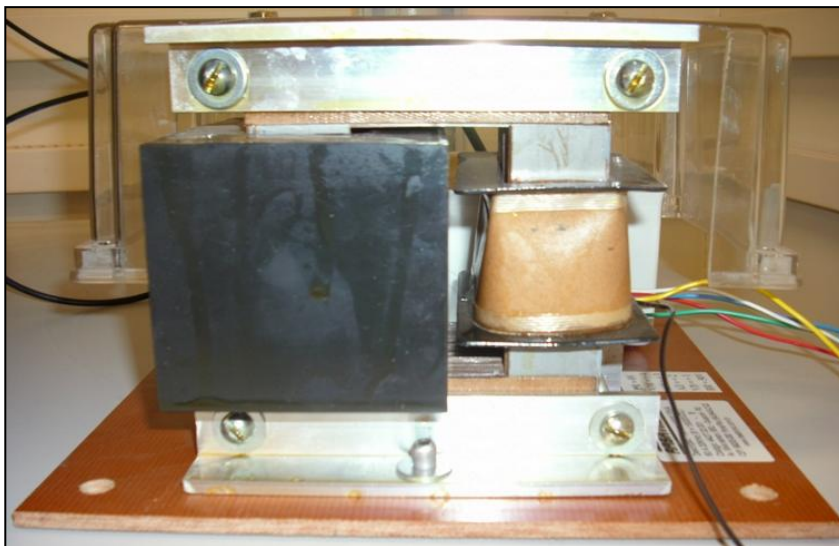


Figura 3.26 – Foto do transformador de alta tensão.

No fim da ponte divisora há um resistor de  $11\text{k}\Omega$ , onde se amostra o sinal com amplitude de cerca de 5 volts. A amostra do sinal é adquirida pelo analisador de sinais, um HP35660A, que envia a análise em frequência para o computador via GPIB, assim como o multímetro, Keithley 197 DMM, que envia o valor RMS da tensão. Na figura 3.27 é vista a foto do sistema para alta tensão montado.

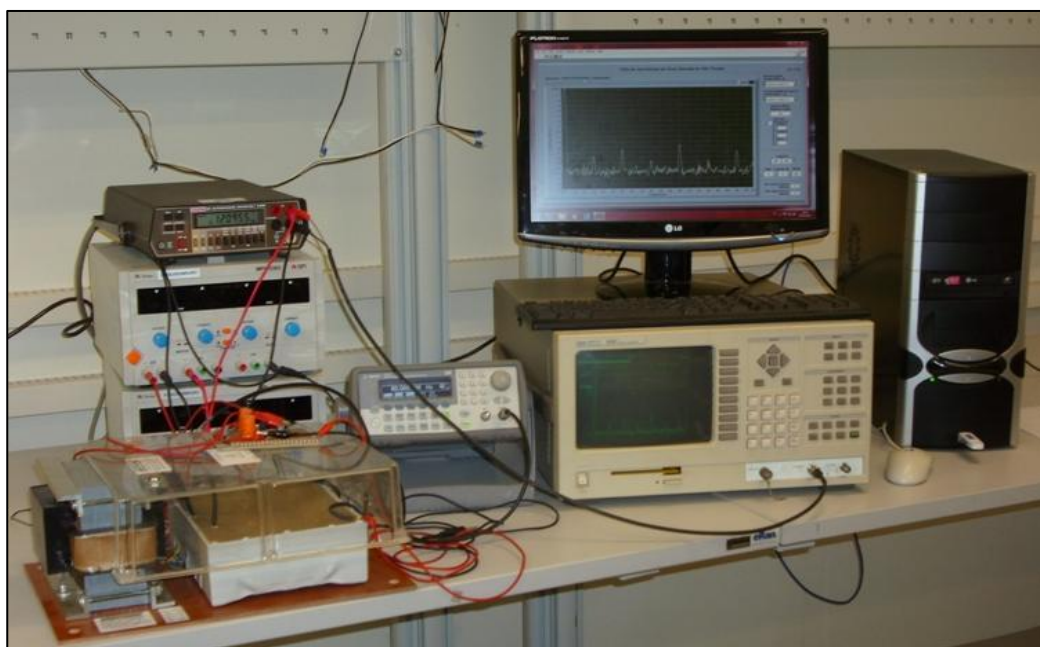


Figura 3.27 – Foto do sistema de alta tensão.



## 4 SOFTWARES

O sistema possui microcontroladores que executam *softwares* desenvolvidos para aquisição e repasse de dados, além disso, há o controle e análise dos dados feitos por um software em Labview executado em um microcomputador. Este capítulo aborda esses *softwares* e a lógica deles, necessários a compreensão do sistema.

### 4.1. Programas dos PICs

Há dois microcontroladores no sistema executando rotinas feitas em C para o controle dos circuitos que eles estão inseridos. O microcontrolador do módulo de interface possui as funções para o repasse de comandos e dados para o módulo câmara. O microcontrolador do módulo câmara executa a rotina de aquisição de dados dos sensores digitais e da indicação da temperatura interna desejada.

#### 4.1.1. Módulo de Interface

A Figura 4.1 apresenta de forma reduzida a rotina executada pelo microcontrolador do módulo de interface.

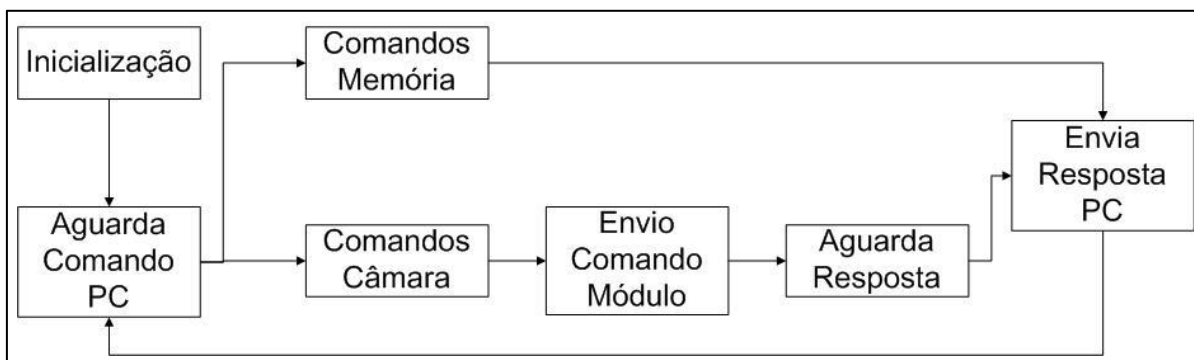


Figura 4.1 – Diagrama da rotina executada pelo microcontrolador do módulo de interface.

A rotina começa com as inicializações necessárias para as interfaces de comunicação e então o microcontrolador espera um comando proveniente do computador para ser executado, ele podem ser separados em dois grupos de comandos: relacionados à memória e os relativos ao módulo câmara.

Os comandos relacionados à memória são basicamente de leitura e escrita da memória de 16Mbits existente no módulo de interface, os comandos relativos a ela são:

- Ler o setup da memória.
- Ler página da memória (528 bytes).
- Escrever no buffer 528 bytes.
- Escrever em uma página da memória os dados do buffer.
- Ler os dados do buffer.
- Carregar uma página da memória para o buffer.
- Apagar uma página.
- Apagar um bloco de 8 páginas da memória.

Os comandos relativos ao módulo câmara resumem-se a leitura e controle dos sensores e atuação no conversor digital-analógico que tem como saída a tensão de *setpoint* relacionada com a temperatura interna que deseja-se. Os comandos relativos ao módulo câmara são:

- Ler a temperatura de um dos 3 sensores LM95071.
- Ler a temperatura do sensor SHT15.
- Ler a umidade do sensor SHT15.
- Adquirir o conteúdo do registrador do SHT15.
- Escrever no registrador do SHT15.
- Escrever no conversor DA TLV5616.

Quando o microcontrolador recebe um comando relacionado a memória ele atua imediatamente e após a realização da tarefa ele envia uma resposta ao computador indicando a conclusão do comando e retorna ao estado de espera de um novo comando.

Se o comando for relacionado ao módulo câmara, o microcontrolador da interface envia o comando via RS485 para o microcontrolador do módulo câmara, espera este realizar a tarefa e enviar os dados ou a resposta de conclusão, para então

reenviar a resposta ao microcomputador, e após esse envio retorna ao estado de espera por um novo comando.

#### 4.1.2. Módulo Câmara

A Figura 4.2 apresenta o diagrama de blocos da rotina que é executada pelo microcontrolador do módulo câmara.

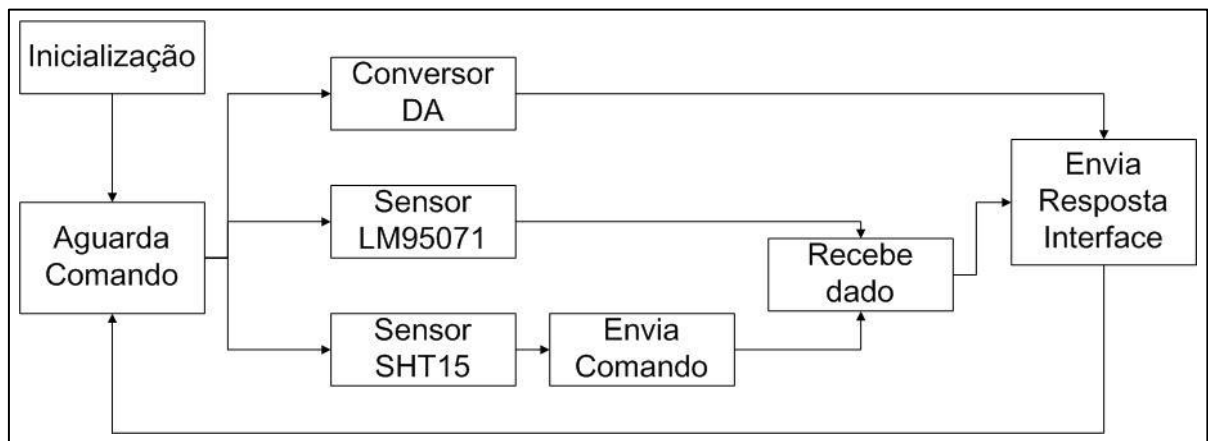


Figura 4.2 – Diagrama da rotina executada pelo microcontrolador do módulo câmara.

Tal como o microcontrolador do módulo de interface após as inicializações dos sensores e da comunicação, o microcontrolador do módulo câmara mantém-se na espera de um comando, desta vez proveniente do módulo de interface.

O comando oriundo do módulo de interface pode ser requisitando a temperatura medida por um dos três sensores do tipo LM95071, temperatura ou umidade adquirida pelo sensor SHT15 ou então um novo valor da temperatura desejada, implicando na alteração do valor de saída do conversor DA.

Caso o comando seja referente a um novo valor de saída do conversor DA, o microcontrolador recebe logo após o comando dois bytes relativos ao novo valor e envia via SPI o comando e o novo valor para o conversor DA, após isso já envia

uma resposta para o módulo de interface indicando que o comando fora executado.

Se o comando for ler a temperatura de um dos três sensores de temperatura do tipo LM95071, como eles já foram previamente inicializados, o microcontrolador inicia-se a aquisição dos dados através da comunicação SPI, os sensores quando ativados e com sinal de *clock* retornam o valor da temperatura, não sendo necessário enviar um comando e esperar a resposta. Assim que recebe os 16 bits o microcontrolador repassa-os para o módulo interface e entra no modo de espera de um novo comando.

O sensor de temperatura e umidade SHT15 requer um comando para retornar um valor de temperatura ou umidade, por isso, se o comando oriundo do módulo de interface for referente à temperatura ou umidade medida por este sensor, há a necessidade de envio de um comando, para após cerca de 300 ms (valor referente a medida de temperatura com 14 bits, pois este tempo depende do número de bits da medida) ele envia os dados da medida. Após o recebimento dos dados o microcontrolador envia os dados adquiridos para o microcontrolador do módulo de interface e retorna ao estado no qual aguarda um novo comando.

## **4.2. Programas em Labview**

Há dois programas em Labview para o controle do sistema, um devotado ao controle a observação da temperatura interna da câmara térmica e outro para a geração e análise do sinal de alta-tensão.

### **4.2.1. Controle da câmara térmica**

A função do programa em Labview relativa ao módulo câmara é servir de interface de controle e observação das temperaturas da câmara térmica. A Figura 4.3 mostra o diagrama de blocos do programa em Labview para a câmara térmica.



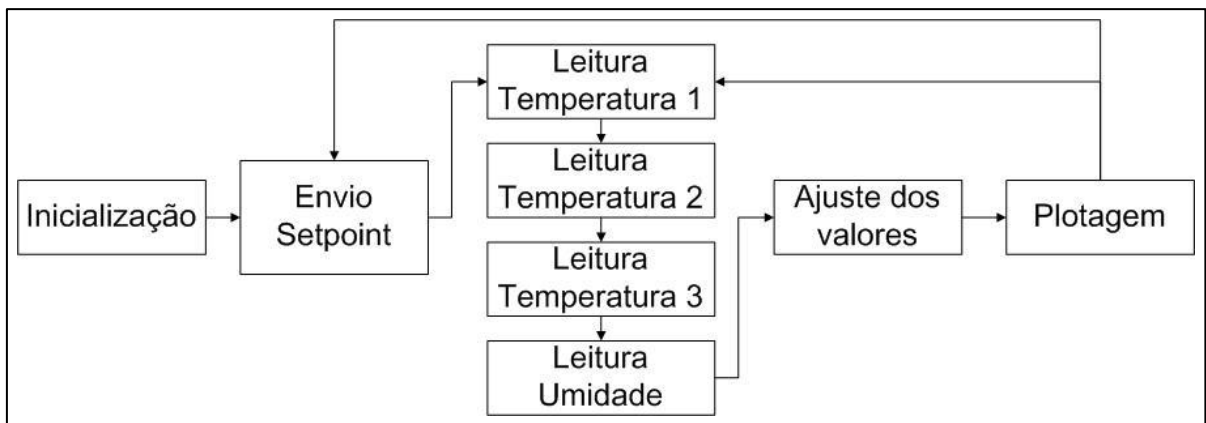


Figura 4.3 – Diagrama de blocos da rotina em Labview para a câmara térmica.

A rotina começa com a inicialização da porta para a comunicação com o módulo de interface, para então enviar o *setpoint* definido pelo usuário na tela principal do programa. Após o envio do *setpoint* inicia a rotina de leitura dos sensores, iniciando com as temperaturas dos sensores LM95071, para então adquirir a umidade medida pelo SHT15. Todos os sensores e mesmo os microcontroladores enviam os dados no formato de bytes, sendo necessário o ajuste destes valores para a escala adequada e também a correção feita através de um ensaio de calibração. Depois do ajuste da escala e calibração os valores obtidos são plotados. Se houver uma mudança no *setpoint* o programa irá enviar o novo valor desejado, caso contrário inicia-se uma nova rodada de medidas de temperaturas e umidade.

Para o usuário é apresentada a tela vista na Figura 4.4, que conta com a opção da porta de comunicação utilizada pela interface, botão de *stop*, caixa para entrada da temperatura interna desejada e o gráfico da temperatura interna ao longo do tempo.

O usuário ainda pode alterar o tempo de amostragem, e navegando pelas abas é possível observar também as temperaturas do dissipador e do bloco intermediário, bem como a umidade interna. Há uma aba para as opções do arquivo a ser salvo

quando finaliza-se a aplicação, caso o local de destino esteja em branco, abre-se uma janela para o usuário escolher o local para salvar o arquivo.

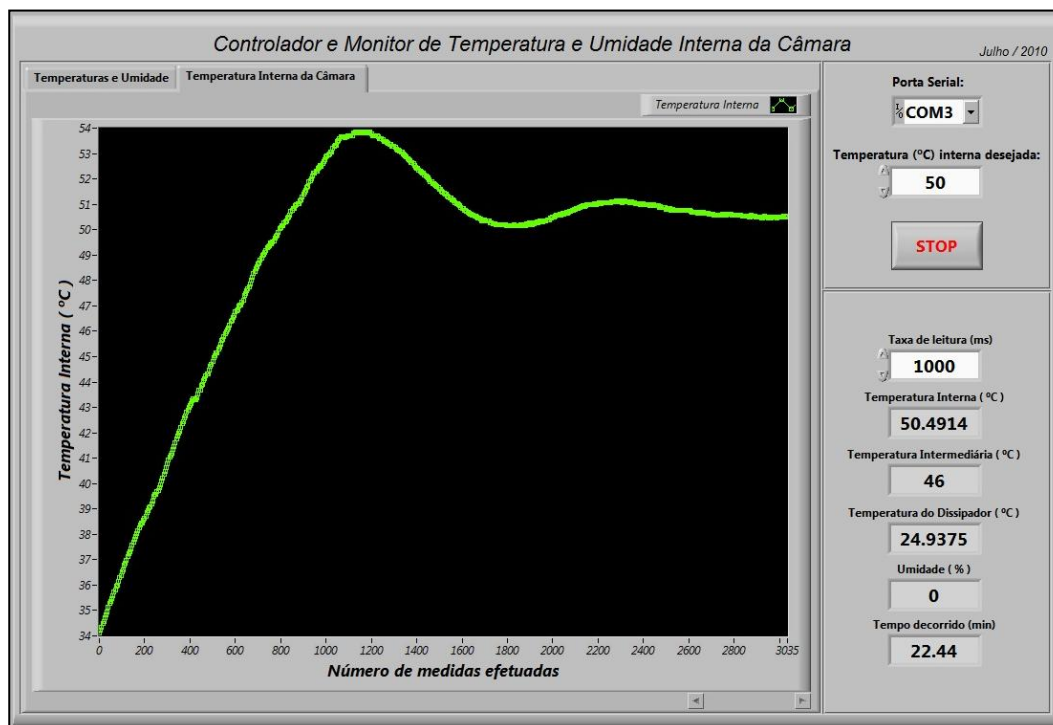


Figura 4.4 – Janela principal do programa em Labview para a câmara térmica.

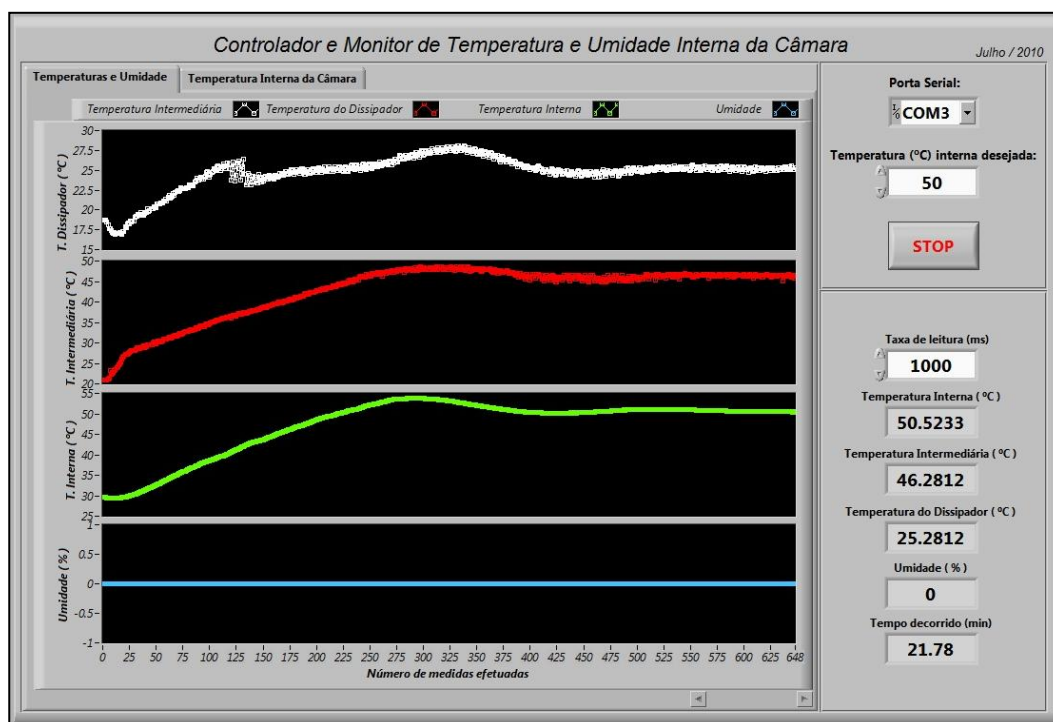


Figura 4.5 – Janela com aba com todos os gráficos da câmara térmica aberto.

A Figura 4.5 apresenta a janela do programa no qual podem ser visto os gráficos das temperaturas do dissipador, do bloco intermediário e interna junto com a umidade interna. Este gráfico não é essencial para o usuário, mas é importante quando há a necessidade da busca de algum problema.

#### 4.2.2. Geração e análise do sinal de alta-tensão

O programa em Labview para a parte de alta-tensão é responsável pelo cálculo das compensações das distorções e da necessidade de aumentar a amplitude do sinal, para que o sinal desejado esteja na saída do transformador de alta-tensão. A Figura 4.6 mostra o diagrama de blocos da rotina executado pelo programa em Labview para a parte de alta-tensão.

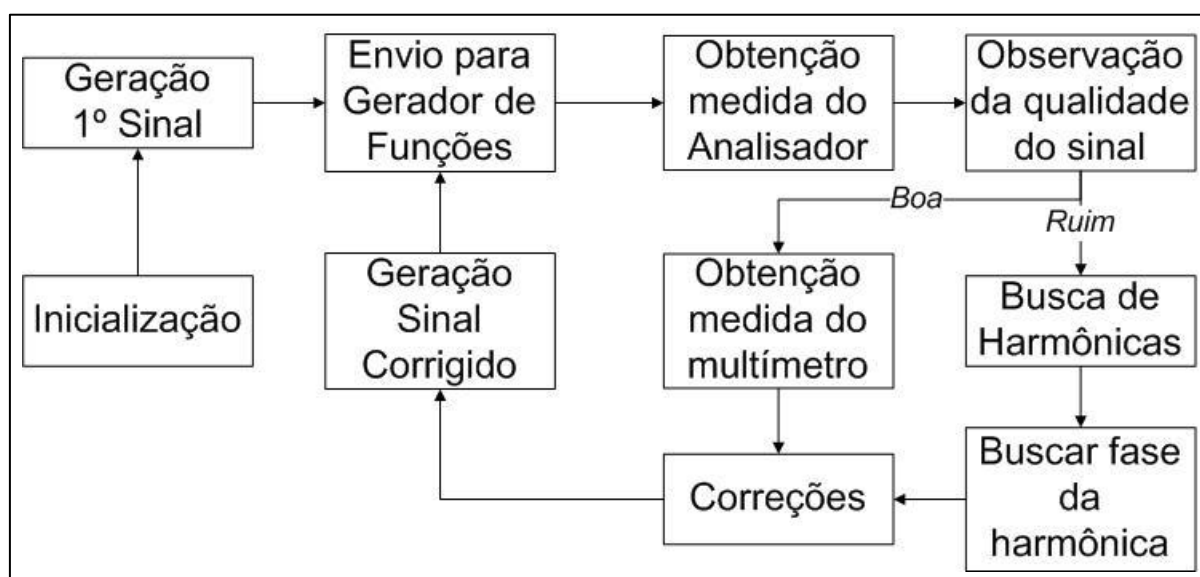


Figura 4.6 – Diagrama de blocos da rotina executada pelo programa em Labview.

Após a inicialização das portas para a comunicação com os equipamentos, há a geração do primeiro sinal, com valores definidos pelo usuário de amplitude e frequência. Este sinal é codificado e envia para o gerador de funções arbitrárias por uma interface GPIB, a saída do gerador de funções passará pelo pré-amplificador e pelo transformador chegando a ponte divisora resistiva na qual o sinal final é amostrado.

O próximo passo do *software* em Labview é adquirir a amostra do sinal através do analisador de sinais, que repassará via GPIB o espectro do sinal. Com esta informação o programa irá analisar se a qualidade do sinal está boa ou ruim, caso esteja ruim, inicia-se a busca por harmônicas do sinal.

Quando encontrado uma harmônica com valor significativo o programa irá buscar pela fase contrária da harmônica, para que se somando uma senóide com a fase contrária, frequência da harmônica e amplitude próxima a vista no sinal aconteça a destruição da harmônica indesejada.

Para determinar a fase contrária da harmônica, primeiro busca-se o quadrante no qual a fase destrutiva está inserida, isto é feito por tentativa e erro, ou seja, soma-se ao sinal original uma senóide com frequência igual, amplitude de 80% da harmônica observada no espectro e com fase igual a fundamental, injeta-se esse sinal no sistema através do gerador de funções e adquire-se o valor de pico da harmônica usando o analisador, guarda-se esse valor, altera-se para  $90^\circ$  a defasagem com a fundamental do sinal adicionado, mantendo os valores de amplitude e frequência, o sinal passa pelo sistema e é amostrado guardando-se o valor do pico da fundamental, faz-se isso com  $180^\circ$  e  $270^\circ$  de defasagem, com os valores de pico adquiridos é possível estimar o quadrante que a fase destrutiva se encontra, por aproximações sucessivas através de novos valores de defasagem busca-se uma maior precisão na fase destrutiva. Quando se encontra uma fase destrutiva próxima o bastante para atuar destrutivamente na harmônica indesejada aumenta-se a amplitude do sinal somado até obter a eliminação da harmônica indesejada, faz-se este processo para as harmônicas presentes no sinal, até que a qualidade do sinal chegue ao nível considerado aceitável pelo usuário.

Caso a qualidade do sinal esteja no nível bom, inicia-se o processo para a verificação se a amplitude do sinal na saída é a desejada. O valor RMS do sinal é adquirido utilizando um multímetro de bancada que se comunica por GPIB, este valor é comparado ao valor estimado pelo *software* para o sinal gerado, se houver

diferenças são feitas aproximações sucessivas da diferença até que a amplitude desejada na saída seja alcançada.

A Figura 4.7 apresenta a janela do programa desenvolvido em Labview para a parte de alta-tensão, nesta figura pode-se observar a onda que se deseja obter na saída do transformador, as identificações dos equipamentos e os parâmetros para controle do sinal.

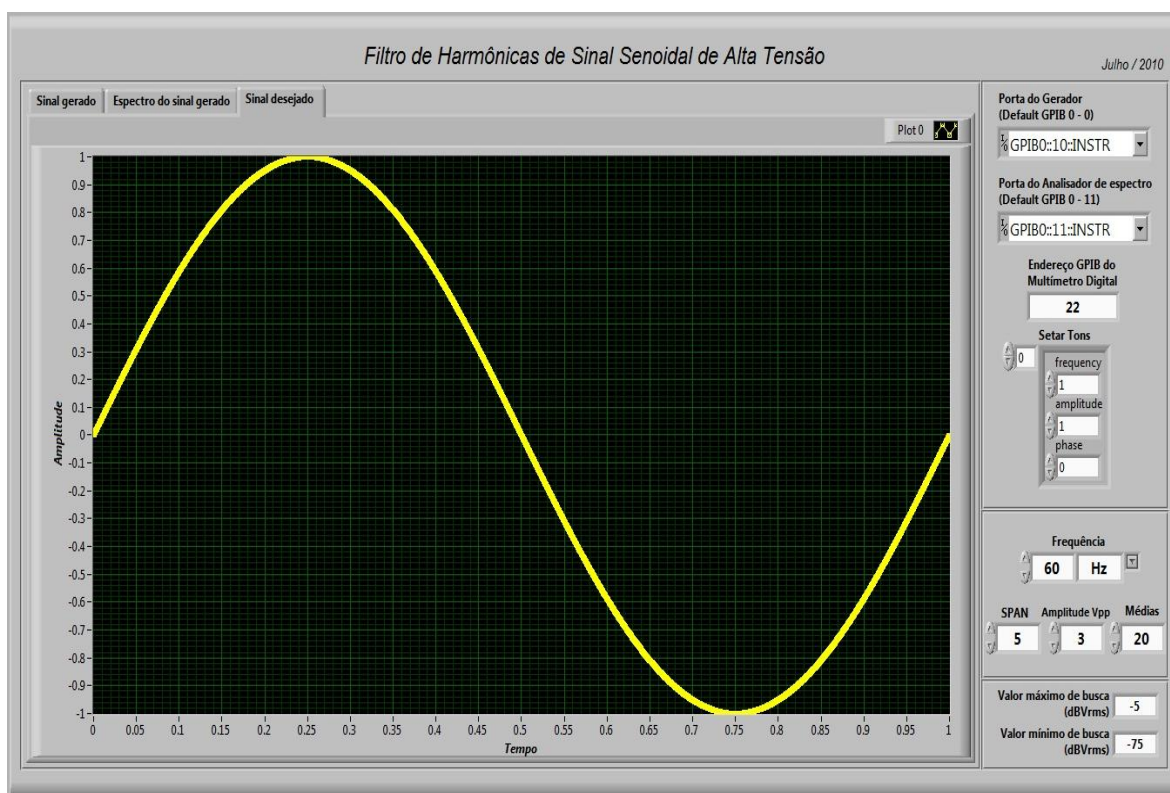


Figura 4.7 – Janela principal do programa em Labview para a parte de alta-tensão.

Durante a execução o programa utiliza diversos dados que podem ser acessados pelo usuário na forma de gráficos, a Figura 4.8 mostra a janela com o gráfico da onda que está na saída do gerador de funções com as correções das distorções.



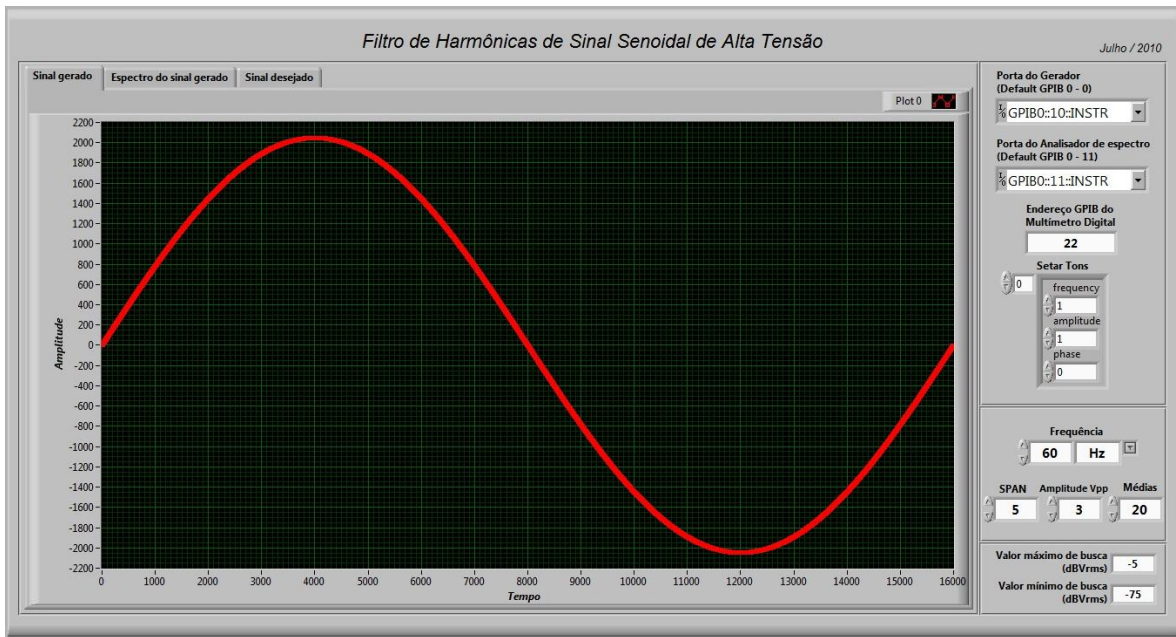


Figura 4.8 – Janela com gráfico do sinal de saída do gerador de funções.

Há ainda um gráfico com os dados vindos do analisador de sinais, Figura 4.9, este gráfico mostra o sinal no domínio da frequência, no formato de frequência por intensidade, com este gráfico é possível observar se há distorções no sinal.

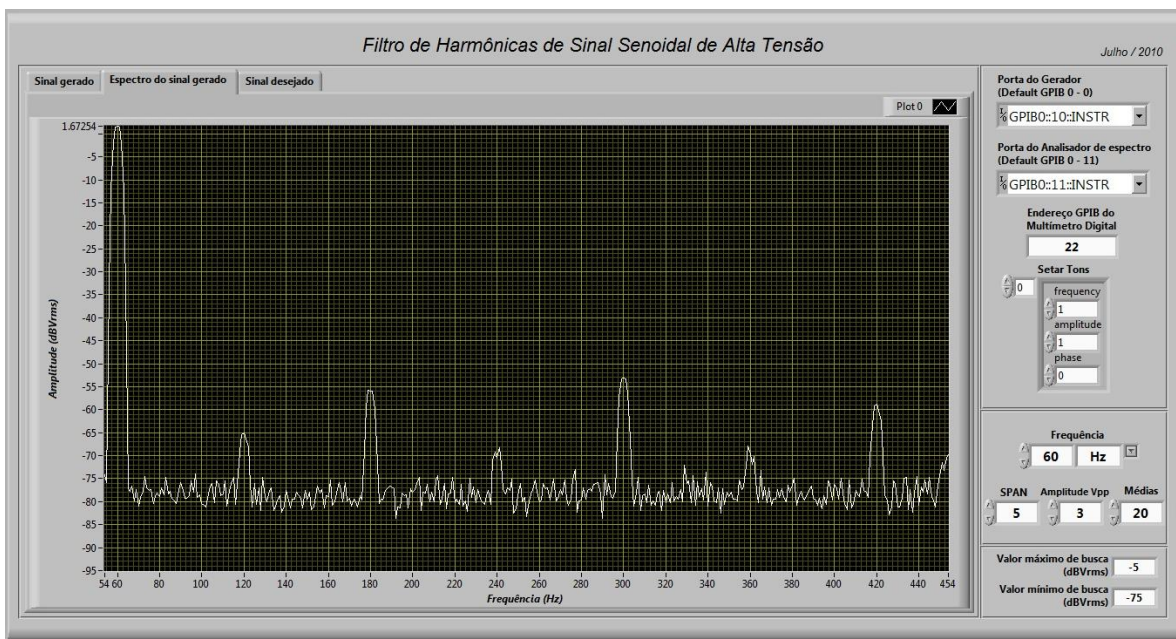


Figura 4.9 – Janela com gráfico do sinal no domínio da frequência.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o estudo dos resultados e observações, os módulos foram testados separadamente. A câmara térmica foi testada para diversas temperaturas e testes com perturbações externas. Para a parte de alta-tensão há testes feitos com tensões mais baixas, já que o foco é a observação da efetividade do método de redução de distorções.

### 5.1. A Câmara Térmica

A câmara térmica foi testada para obtenção dos parâmetros de alimentação dos módulos termoeletrônicos que tornam o processo de aquecimento e resfriamento o mais rápido possível. Então foram feitos ensaios para sintonizar os controladores PID e finalmente ensaios que apresentam as respostas do sistema ajustado.

#### 5.1.1. Calibração e obtenção dos parâmetros

Primeiramente foi feita a calibração do sensor de temperatura interna, os valores da temperatura interna, que são adquiridos por um sensor LM95071, foram corrigidas através da comparação com o valor fornecido por um AD590 usado como referência.

A Figura 5.1 apresenta o gráfico utilizado para obtenção da relação entre a temperatura medida pelo sensor LM95071 e a temperatura de referência adquirida usando um AD590 ligado a um multímetro de bancada. A equação resultante é vista abaixo:

$$T_{corrigida} = 1,174 + 1,0208.T_{medida} \quad (5.1)$$

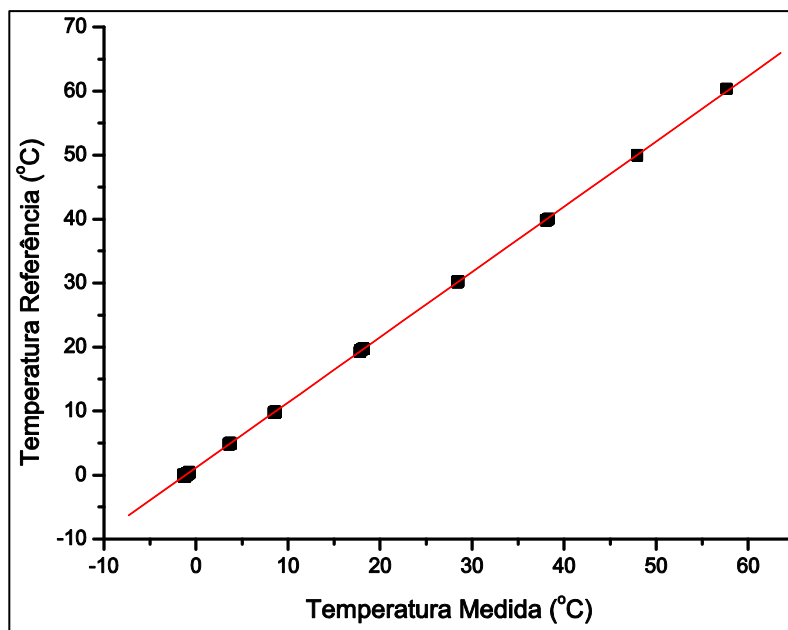


Figura 5.1 – Gráfico utilizado para corrigir a temperatura.

Entao buscou-se determinar a temperatura mínima que o interior da câmara térmica alcançaria. A Figura 5.2 apresenta o resultado do teste.

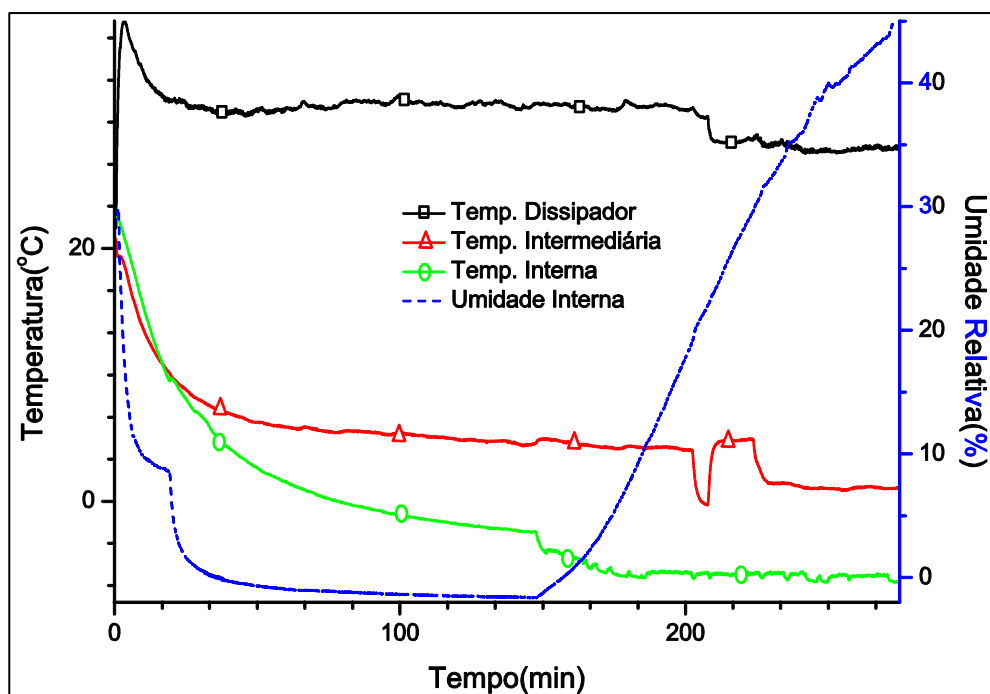


Figura 5.2 – Gráfico do ensaio para determinação da menor temperatura.



Para a determinação da menor temperatura que o interior da câmara alcança o ensaio é realizado sem atuação do controle PID e consequentemente sem a utilização da parte de potência do circuito da câmara. Os módulos termoeletrônicos foram ligados diretamente às fontes de bancada, que forneciam a tensão contínua necessária.

O teste é iniciado com fluxo de nitrogênio no interior da câmara, com o TEM superior sendo alimentado com 13 volts e 6 ampères, o TEM inferior com 5 volts e 2,6 ampères. A tensão máxima de alimentação do módulo termoeletrônico, fornecida pelo fabricante, é de 14,5 volts com corrente máxima de 8,5 ampères, não foram utilizados estes valores pois testes preliminares apontaram que esta era a configuração que apresentava melhores resultados no resfriamento da câmara.

Como pode ser observado na curva pontilhada na Figura 5.1 a umidade relativa tem um comportamento descendente até cerca de 150 minutos, pois neste instante o fluxo de nitrogênio é desligado, e pode ser observada uma queda na temperatura interna com o cessar do fluxo. Embora o sensor de umidade forneça como medida valores negativos de umidade, o fabricante recomenda que os valores negativos sejam considerados 0%. A temperatura mínima alcançada pelo sistema foi de  $-6,4^{\circ}\text{C}$ , com a temperatura ambiente próxima a  $20^{\circ}\text{C}$ .

No ensaio com o resultado apresentado na Figura 5.2 são testados ainda alguns conjuntos de valores para alimentação dos módulos termoeletrônicos para observar se havia redução na temperatura interna, de tal forma que no final chegaram-se às temperaturas mínimas da câmara, no fim TEM superior era alimentado com 11 volts e 5,1 ampères e o TEM inferior com 4 volts e 2,2 ampères.

Com o gráfico apresentado na Figura 5.2 é possível constatar que a câmara interna não está bem vedada, de tal modo que assim que cessa-se o fluxo de nitrogênio gasoso a umidade relativa inicia um movimento de alta, evidenciando a entrada de ar vindo do ambiente externo. É possível ainda estimar a transferência de potência de cada um dos módulos termoeletrônicos no fim do ensaio, o que

possibilita analisar os dados experimentais com os projetados pelo software AZTEC.

O fabricante dos TEMs fornece na forma de gráfico a relação existente entre a diferença de temperatura entre as placas do TEM, a corrente elétrica que alimenta o módulo termoeletrico e a potência térmica que o TEM transporta. A Figura 5.3 apresenta o gráfico da diferença de temperatura entre as placas do TEM (Delta T) pela potência térmica transportada ( $Q_c$ ) para vários valores de corrente.

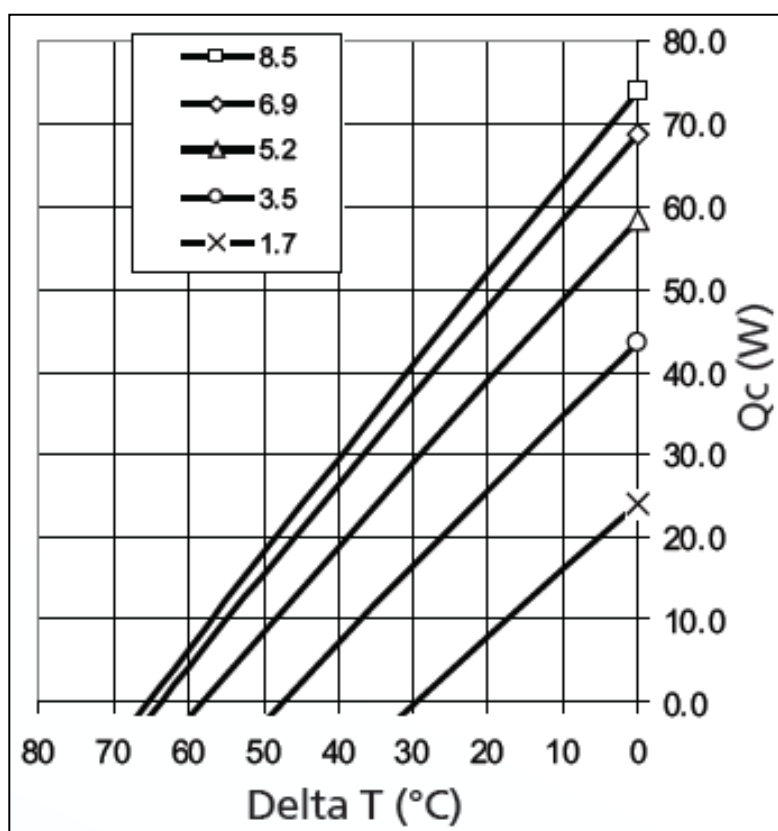


Figura 5.3 – Gráfico da diferença de temperatura pela potência transportada.

Fonte: Laird Technologies (2008).

Nos instantes finais o interior da câmara tem a temperatura de  $-6,4^{\circ}\text{C}$ , no bloco intermediário  $1^{\circ}\text{C}$  e no dissipador  $27,8^{\circ}\text{C}$ . Assim o TEM inferior está com uma diferença de temperatura de  $7,4^{\circ}\text{C}$  e uma corrente de 2,7 ampères, estima-se pelo gráfico que o TEM transporte cerca de 20 watts, um valor acima do 11 watts

previstos pelo software AZTEC. A diferença pode ser explicada devido a perdas para o ambiente, que podem ser observadas pelo aumento da umidade interna assim que o fluxo de nitrogênio cessa, evidenciando a influência do ambiente externo.

O TEM superior é submetido a uma diferença de temperatura de  $26,8^{\circ}\text{C}$  e com uma corrente de 5,1 ampères, estimando-se 30 watts transportados, o que é esperado, já que o TEM inferior para transportar os 20 watts e produz outros 8,8 watts.

Observou-se experimentalmente que por causa da configuração em série dos módulos termoeletricos o conjunto ideal dos parâmetros de fornecimento de tensão não estão na utilização dos módulos termoeletricos na máxima potência. A Figura 5.4 apresenta o resultado de três ensaios realizados com o intuito de comprovar que o módulo termoeletrico inferior não deve ser alimentado com tensão superior a 5 volts.

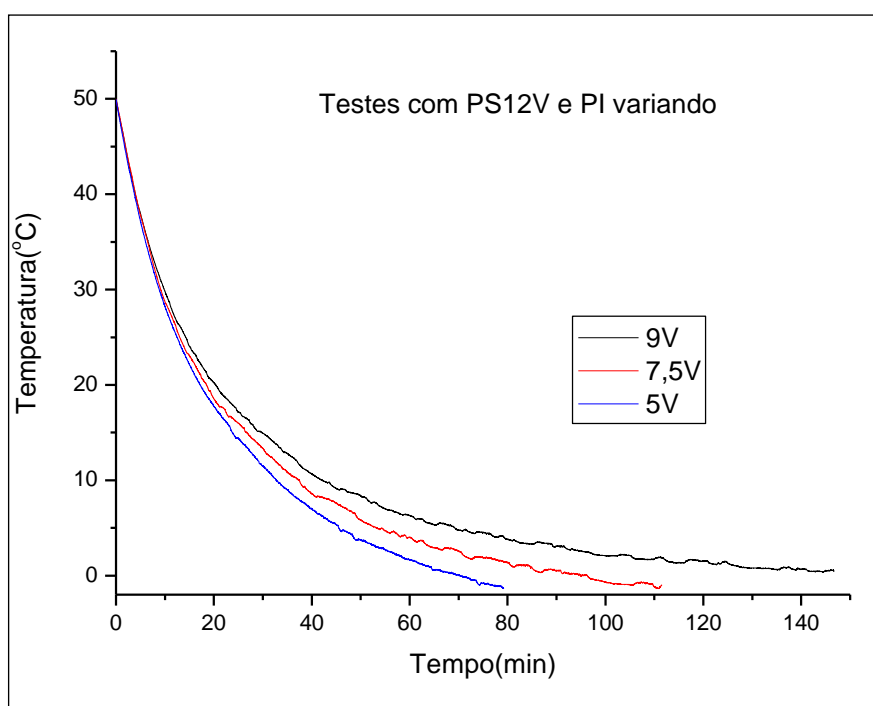


Figura 5.4 – Gráfico da obtenção da melhor configuração para resfriamento.

Nestes ensaios a tensão do TEM superior é constante em 12 volts, enquanto a do TEM inferior foi alterada para três valores, 5 volts, 7,5 volts e 9 volts. A diferença no processo de resfriamento causado pela mudança dos valores de alimentação são perceptíveis, com uma alimentação de 9 volts o sistema não consegue sequer chegar à 0°C, e o tempo até o regime é de 140 minutos. A curva para a alimentação com 5 volts tem a melhor resposta das três, em menos de 80 minutos ela ultrapassa 0°C, sem mostrar indícios de que chegara próximo a condição de regime.

Com isto é possível inferir que a explicação para que os dois módulos termoeletricos não possuam a mesma alimentação deve-se ao fato do TEM superior ter que transportar a potência transportada e gerada pelo TEM inferior, inclusive esta é a explicação para que os fabricantes produzam módulos em série no formato de pirâmide que permitem uma diferença de temperatura maior entre as placas, mas acarreta na diminuição da potência possível de ser transportada.

O dispositivo da Figura 5.5 possui quatro estágios em série, a diferença entre o lado quente (base) e o lado frio (ponta) pode chegar até 122°C, mas a potência transportada com uma alimentação de 7 volts e 3,5 ampères é de 0,8 Watts.

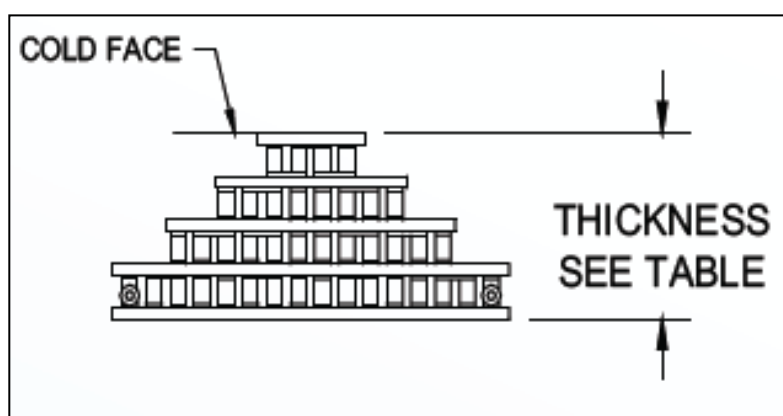


Figura 5.5 – Dispositivo com 4 estágios.

Fonte: Laird Technologies (2009)

As entradas dos controladores PID é a diferença entre a temperatura de setpoint e a temperatura medida, ambas na forma de tensão, na escala de 32 mV/°C:

$$v_{entrada} = v_{setpoint} - v_{medida} \quad (5.2)$$

O *setpoint* do módulo termoeletrico inferior é dado diretamente pela tensão de saída do conversor digital-analógico, que é fornecida pelo usuário no *software* de controle.

O TEM superior tem a função de manter a face superior do TEM inferior próxima as condições ideais de funcionamento, como pode ser vista no ensaio para obtenção da menor temperatura, a temperatura intermediária não se encontra na média da temperatura interna e da temperatura do dissipador, mas próxima a temperatura interna da câmara.

O *setpoint* do TEM superior é ajustado para:

$$v_{setpoint} = 0,8v_{interno} + 0,2v_{dissipador} \quad (5.3)$$

A Figura 5.6 apresenta o gráfico para a determinação do conjunto de parâmetros utilizado para aquecimento, mantendo-se o TEM inferior com 12V e variando a tensão no TEM superior observa-se que a resposta do sistema para o aquecimento.

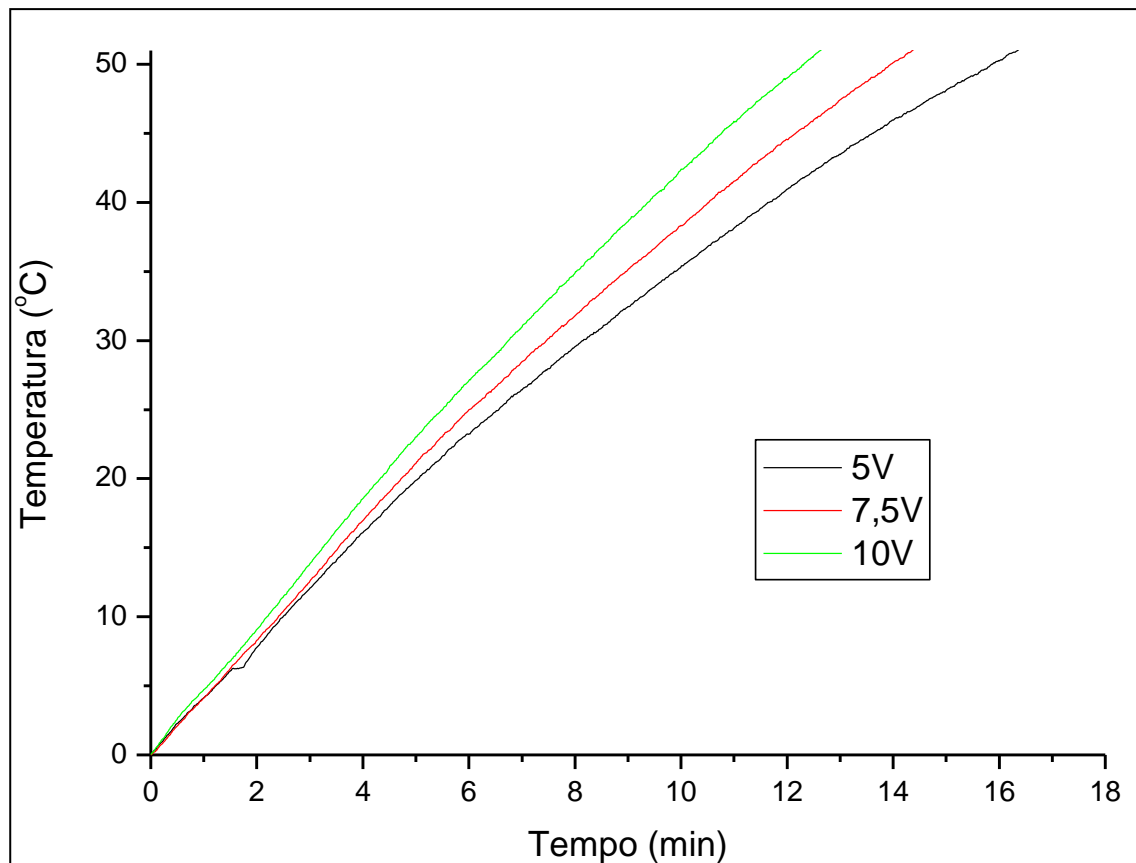


Figura 5.6 – Gráfico da obtenção da melhor configuração para aquecimento.

Ao observar o gráfico apresentado na Figura 5.6 vê-se que para o aquecimento é um processo muito mais rápido do que o resfriamento. A tensão utilizada para a alimentação do TEM superior poderia ser qualquer um dos valores, já que a diferença seria 2 a 4 minutos, porém foi ajustada a tensão para próxima de 7,5 Volts, pois era nesta condição que se repetiam as condições vistas no resfriamento que determinaram a equação 5.3.

Com estes resultados ajustam-se os circuitos limitadores na saída dos controladores PID, o controlador PID do TEM inferior foi limitado inferiormente com -2,31V e superiormente 6,73, gerando *duty cycles* de 63,72% e 14,53%. Para o TEM superior os valores são de -5,39V e 3,33V, com *duty cycles* de 80,56% e 32,98% .

### **5.1.2. A sintonia dos controladores PID**

Os controladores PID precisam ter seus parâmetros determinados e possivelmente tornados ótimos, para uma melhor resposta a variações e minimizar o erro em regime.

Existem vários métodos para a determinação dos parâmetros ótimos para a sintonia de controladores PID, a melhor configuração irá depender muito do sistema que se deseja controlar.

Para a câmara térmica tentou-se os métodos de Ziegler-Nichols e de Cohen-Coon, ambos para malha aberta, o modo de determinação é apresentado no Apêndice C, assim como os resultados obtidos através desses métodos.

Os conjuntos de ganhos calculados, tanto pelo método de Cohen-Coon quanto de Ziegler-Nichols, foram aplicados nos controladores, e em todos os casos o sistema oscilou. Trocou-se assim o método para a obtenção dos ganhos do controle, agora não mais visando parâmetros ótimos, mas apenas que tornassem o sistema estável.

O método de busca destes parâmetros basicamente consiste em primeiramente deixar só a parte proporcional do controle atuando, elevando o ganho até o ponto em que o sistema oscile, o valor de 80% do último do ganho em que o sistema não oscilasse foi o valor utilizado para o ganho proporcional. Mantendo o controle proporcional com o valor recém encontrado liga-se a parte integral buscando novamente o valor de ganho imediatamente anterior à oscilação do sistema, para mais uma vez utilizar como valor do ganho 80% do último valor precedente a oscilação, e por fim liga-se a parte derivativa para encontrar o ganho usando o mesmo critério.

TABELA 5.1 – PARÂMETROS ENCONTRADOS ATRAVÉS DA ELEVAÇÃO DOS GANHOS

TEM Superior			
Ganho	Kc	Ti	Tc
Valor	20	17,625	2
TEM Inferior			
Ganho	Kc	Ti	Tc
Valor	49,9	9,8	0,664

Estes valores quando aplicados ao sistema o tornam estável em regime, no transiente podem haver pequenas oscilações na temperatura intermediária porque o seu *setpoint* está variando e efeito causado pelo sensor utilizado, contudo quando chega-se ao regime as oscilações cessam. A Figura 5.7 apresenta um gráfico que mostra essas oscilações, a linha contínua é a temperatura intermediária e a linha pontilhada a temperatura interna, o ensaio neste caso é um aquecimento até 70°C partindo da temperatura ambiente.

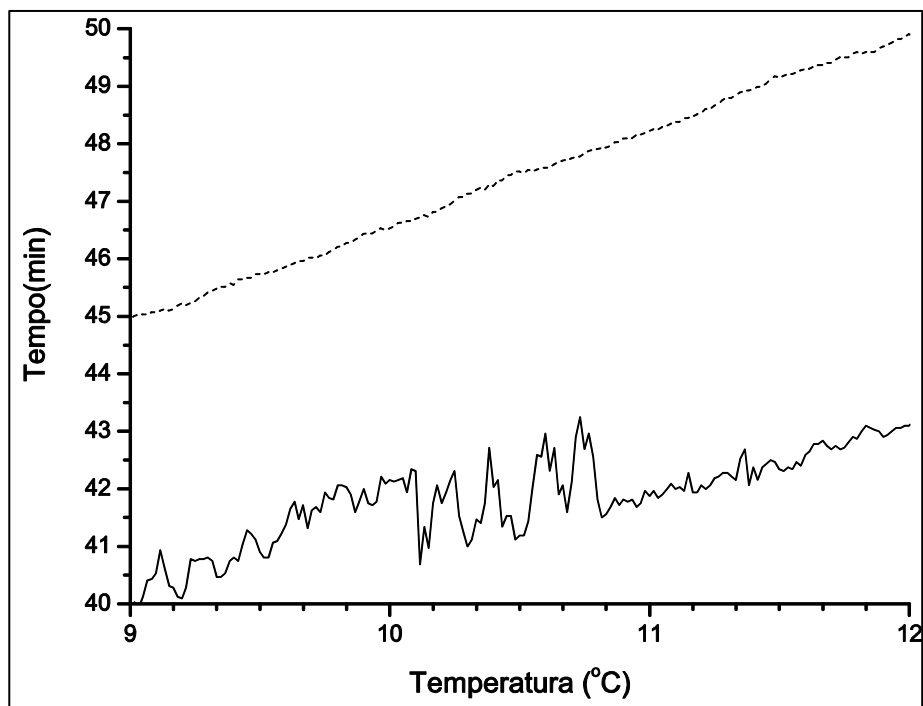


Figura 5.7 – Gráfico das oscilações na temperatura intermediária.



Sobre os valores dos ganhos encontrados é possível notar diferenças grandes entre os ganhos para o TEM superior e o inferior. O sistema equivalente que o TEM superior controla tem uma resposta mais rápida, pois a massa térmica na qual se atua é bem menor. O TEM inferior atua sobre uma massa térmica maior, tornando a resposta do sistema lenta, com isso o ganho derivativo é quase desprezível em relação ao ganho proporcional, já que não há necessidade de correção de oscilações rápidas.

### 5.1.3. Ensaios com os controles ajustados

O primeiro teste após os ajustes do sistema foi levar o sistema para 0°C e observar a estabilidade, a Figura 5.8 apresenta o gráfico do declínio da temperatura interna no tempo.

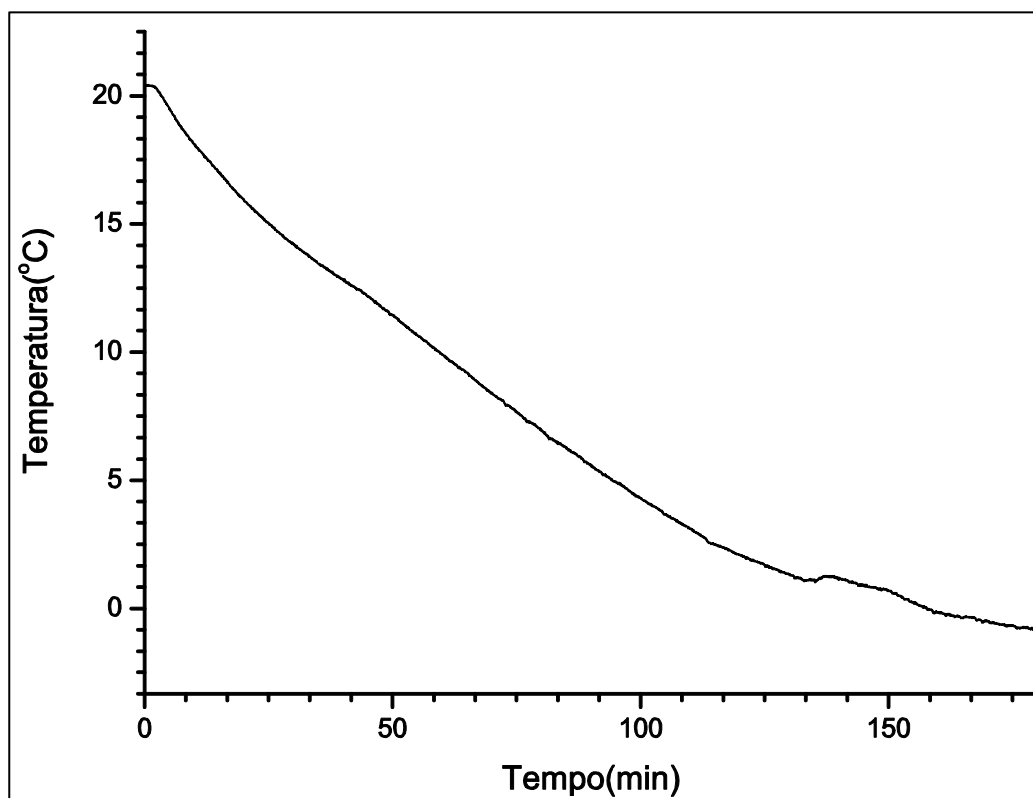


Figura 5.8 – Curva da descida da temperatura para estabilização do sistema em 0°C.

A curva do transiente para a aplicação não é tão importante como a manutenção da estabilidade em regime, a maior preocupação no transiente é que não houvesse um overshoot muito grande, o que no resfriamento por ser um processo bem mais lento do que o aquecimento não é observável. No processo de aquecimento observa-se um *overshoot*, não algo em torno de no máximo 2°C, totalmente tolerável.

A Figura 5.9 apresenta o gráfico da variação da temperatura em regime, próximo à 0°C, minutos após a chegada a temperatura desejada. Os traços em cinza são as medidas do sensor, que tem resolução de 0,03125°C, nota-se que a variação nos 20 minutos apresentados praticamente resume-se a quatro vezes a resolução do sensor e que esta variação é de cerca de 0,16°C. A curva escura é a média feita usando os 10 pontos anteriores e 10 pontos posteriores em cada instante, possibilitando observar a tendência da temperatura interna, mesmo entre as escalas do sensor de temperatura utilizado.

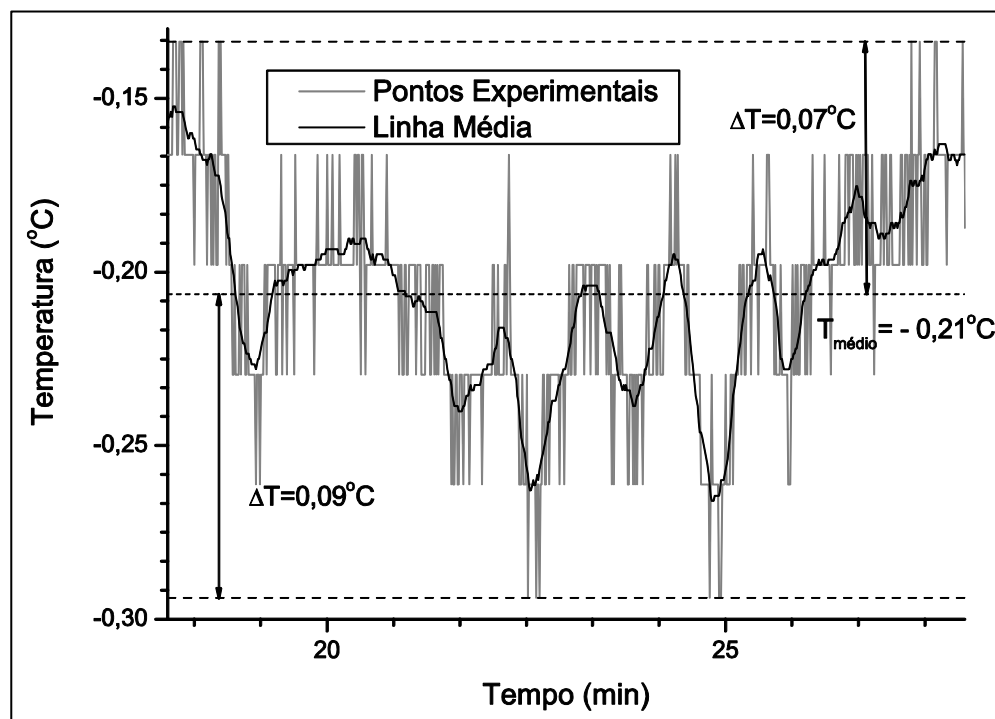


Figura 5.9 – Variação da temperatura no tempo próximo à 0°C.

A curva na qual se utilizam médias possui uma variação menor do que se considerarmos os pontos adquiridos pelo sensor. No limite inferior há poucos pontos para os quais o sistema se aproxima de  $-0,3^{\circ}\text{C}$ , o que também é observável no limite superior do gráfico apresentado na Figura 5.9.

No limite superior proposto para o sistema  $70^{\circ}\text{C}$ , conforme a Figura 5.10, há um overshoot de  $2^{\circ}\text{C}$ , mas a estabilidade é logo alcançada. No gráfico abaixo é possível observar como a temperatura intermediária acompanha a temperatura interna como planejado, é visível também as oscilações na temperatura do dissipador provocadas principalmente por causa da ação do acionamento do ar condicionado da sala, que interferem no *setpoint* do TEM superior dado pela equação 5.3.

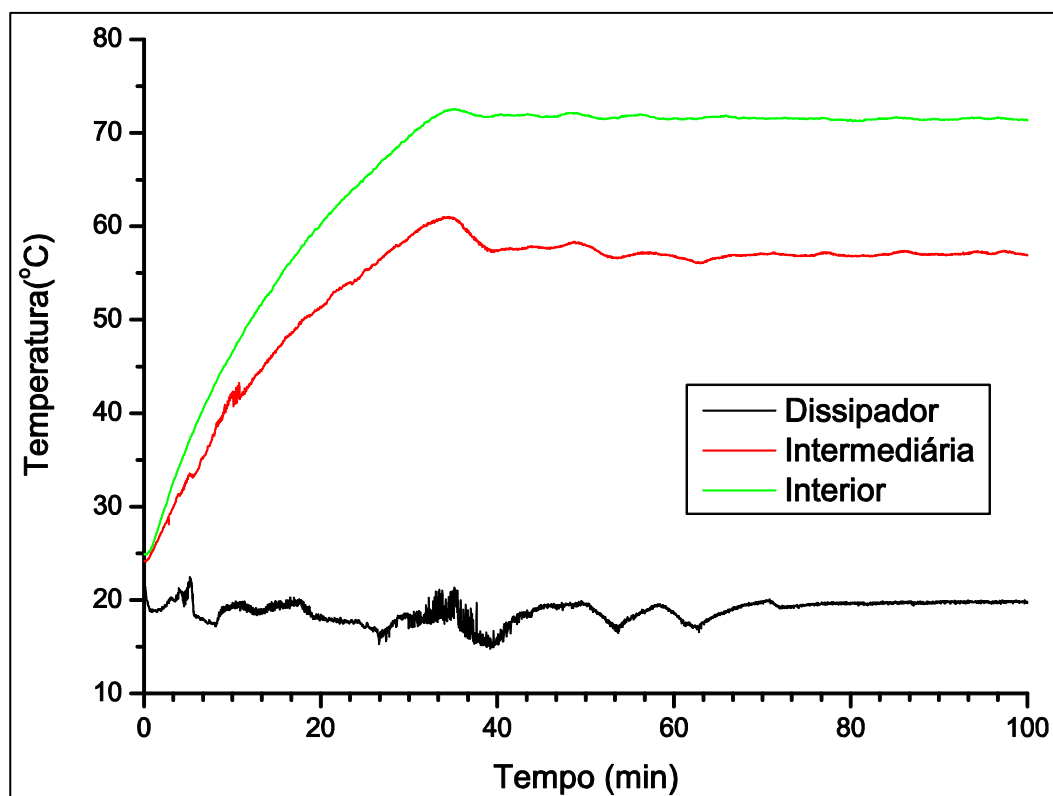


Figura 5.10 – Curvas das temperaturas do sistema para ajuste de  $70^{\circ}\text{C}$ .

A variação da temperatura quando o sistema está em regime próximo à 70°C é parecida com a observada para 0°C, resume-se a aproximadamente 0,16°C como é apresentado na Figura 5.11.

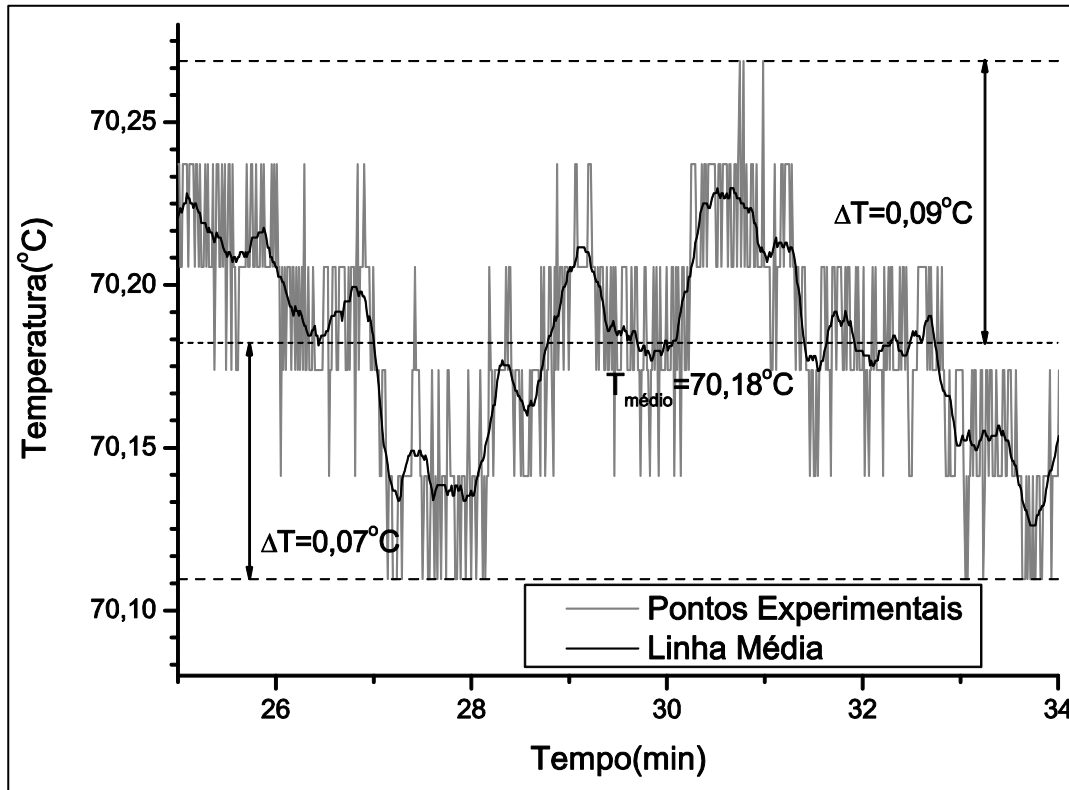


Figura 5.11 – Variação da temperatura próxima à 70°C.

Na Figura 5.11 a temperatura desejada é de 70°C, a temperatura de regime do sistema é de 70,18°C, ou seja um erro de +0,18°C na temperatura de controle, este erro para o *setpoint* em 0°C, é de -0,21°C. O erro encontrado na temperatura de controle é comparável ao erro encontrado nas câmaras comercializadas que são da ordem de  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ .

A Figura 5.12 mostra o transiente para várias mudanças da temperatura de *setpoint* e o comportamento em regime após o transiente. Todos os transientes são devido ao aquecimento da câmara, inicialmente o aumento da temperatura de *setpoint* era de 5°C, posteriormente utilizou-se 10°C, com isto o *overshoot* na temperatura interna aumentou, devido ao maior tempo que o capacitor utilizado no

ganho integral teve para carregar, e conseqüentemente o tempo para a estabilização da temperatura interna também cresce.

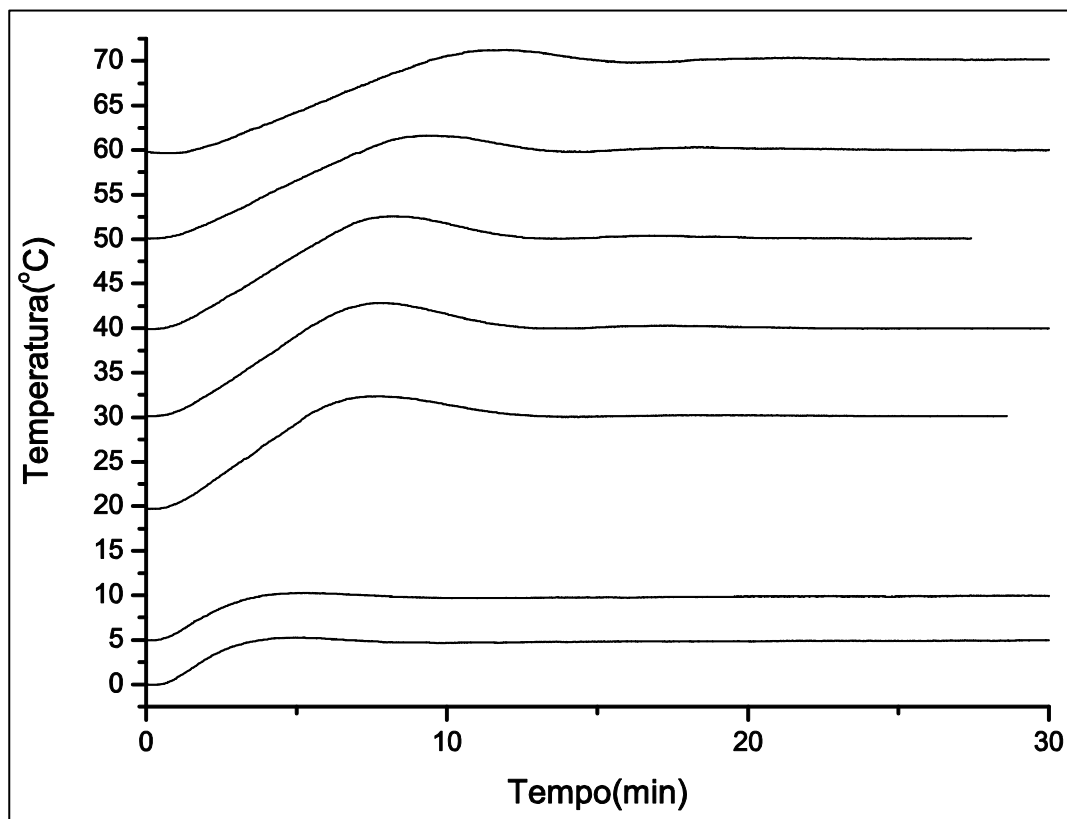


Figura 5.12 – Curvas de temperatura para diversos setpoints.

No projeto inicial da câmara térmica, a opção pelos módulos termoelétricos em série como atuadores deveu-se a possibilidade de alcançar temperaturas mais baixas, o tamanho menor e a facilidade de controle dos módulos termoelétricos. Um efeito adicional, agora não mais somente da utilização dos módulos termoelétricos, mas também da configuração em série deles, é o amortecimento de distúrbios externos na temperatura interna.

Os próximos gráficos são os resultados de testes nos quais criam-se perturbações na temperatura do dissipador para observar os efeitos na temperatura interna. Essa perturbação foi provocada desligando-se o ventilador existente no dissipador externo, provocando um aumento da temperatura que o módulo termoelétrico é submetido em um dos seus lados.

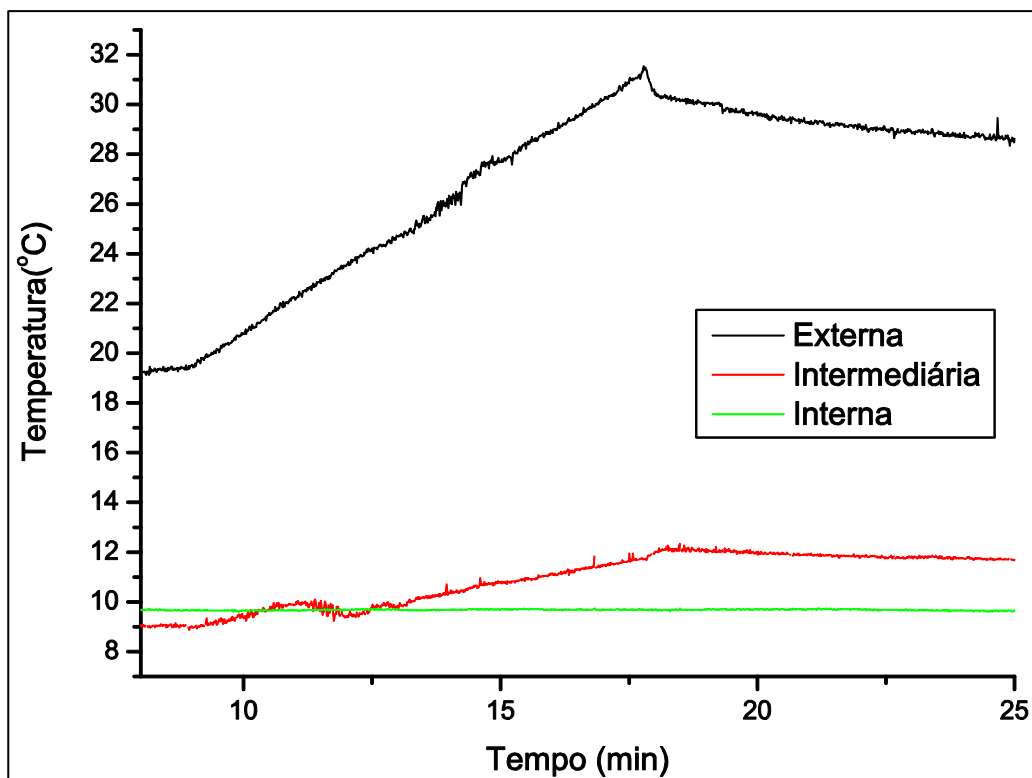


Figura 5.13 – Reação do sistema à perturbação próxima à 9,8°C.

O gráfico apresentando na Figura 5.13 demonstra como a temperatura externa eleva-se com desligamento do ventilador do dissipador externo, há uma elevação de cerca de 12°C, para então chegar ao ponto de máxima e iniciar o resfriamento após o controlador do módulo termoeletrico superior chegar ao novo estado de equilíbrio, ajustando a potência necessária para atuação eficaz do TEM.

Ainda sobre o gráfico da Figura 5.13 observa-se que a temperatura intermediária inicialmente não se encontra no ponto estabelecido pela equação 5.3, a causa disto é o sensor NTC utilizado e a linearização dele para o condicionamento do sinal. Como pode ser observado na Figura 3.9 nos extremos de temperatura utilizada a tensão do NTC não tem mais uma resposta linear, fazendo com que a aproximação linear feita no condicionamento do sinal como a ter desvios.

O mais importante é a resposta da temperatura interna, na Figura 5.13 é imperceptível a variação, para isto apresenta-se na Figura 5.14 o gráfico do

comportamento da temperatura interna no tempo. A oscilação em regime é a menor observada até então, com  $0,12^{\circ}\text{C}$  de oscilação, o erro na temperatura de controle também é pequeno,  $-0,11^{\circ}\text{C}$ .

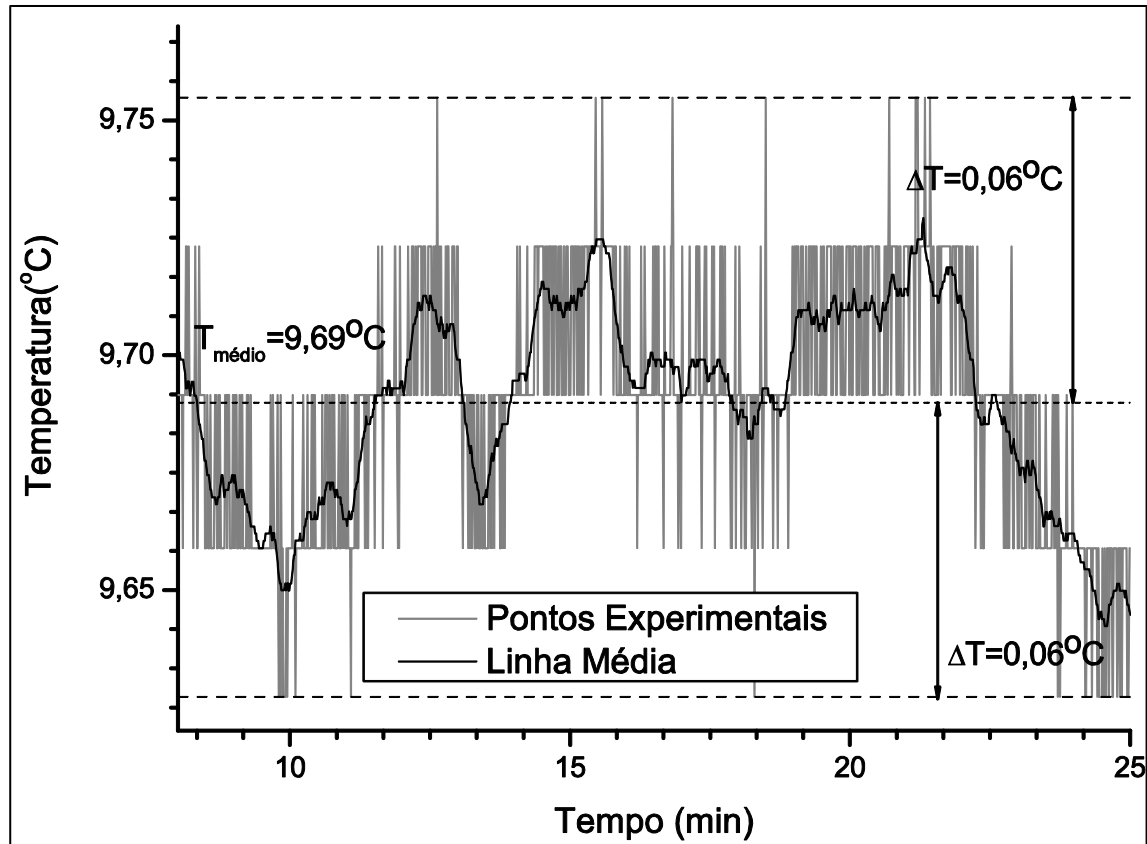


Figura 5.14 – Temperatura interna quando há perturbação próxima à  $9,8^{\circ}\text{C}$ .

A resposta a perturbação foi testada com outro valor de temperatura interna, a Figura 5.15 apresenta o resultado para a perturbação com a temperatura interna de  $50,2^{\circ}\text{C}$ . Para este caso a perturbação no dissipador é menor que  $10^{\circ}\text{C}$ , a grande diferença é que neste caso o dissipador está no lado frio do TEM superior, e não no lado quente, como no caso anterior. É possível observar as oscilações na temperatura internas decorrentes da mudança do *setpoint* do TEM superior, que logo são extintas.

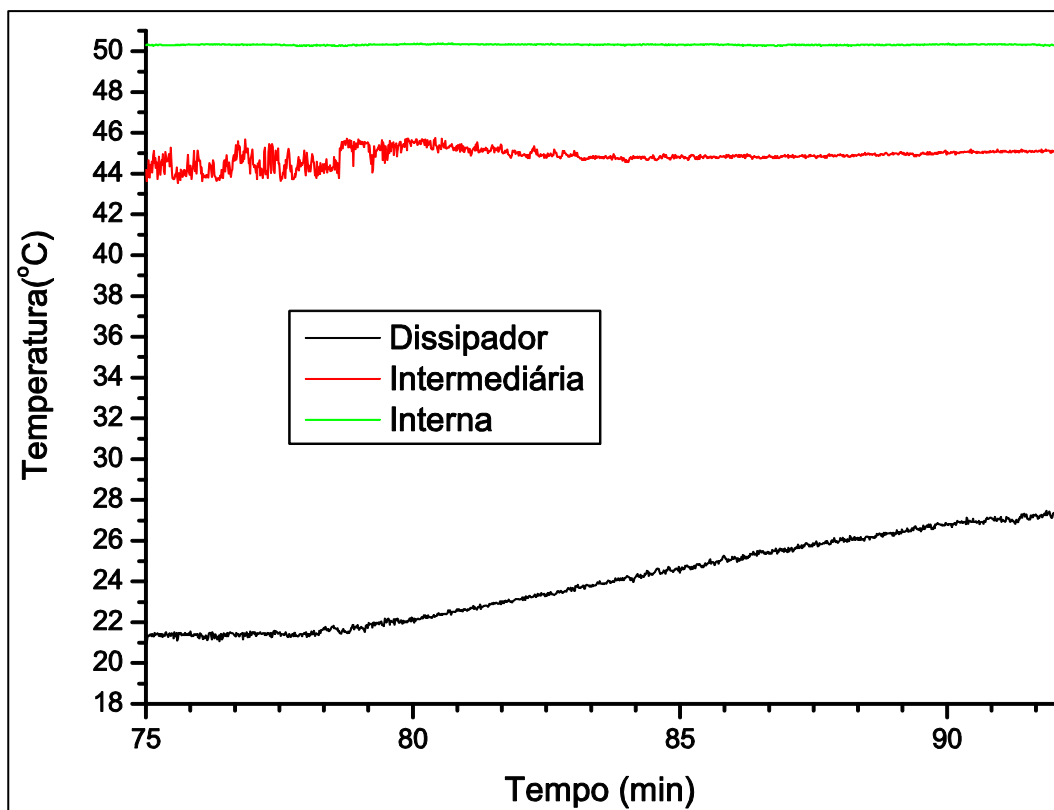


Figura 5.15 – Reação do sistema à perturbação próxima a 50,2°C.

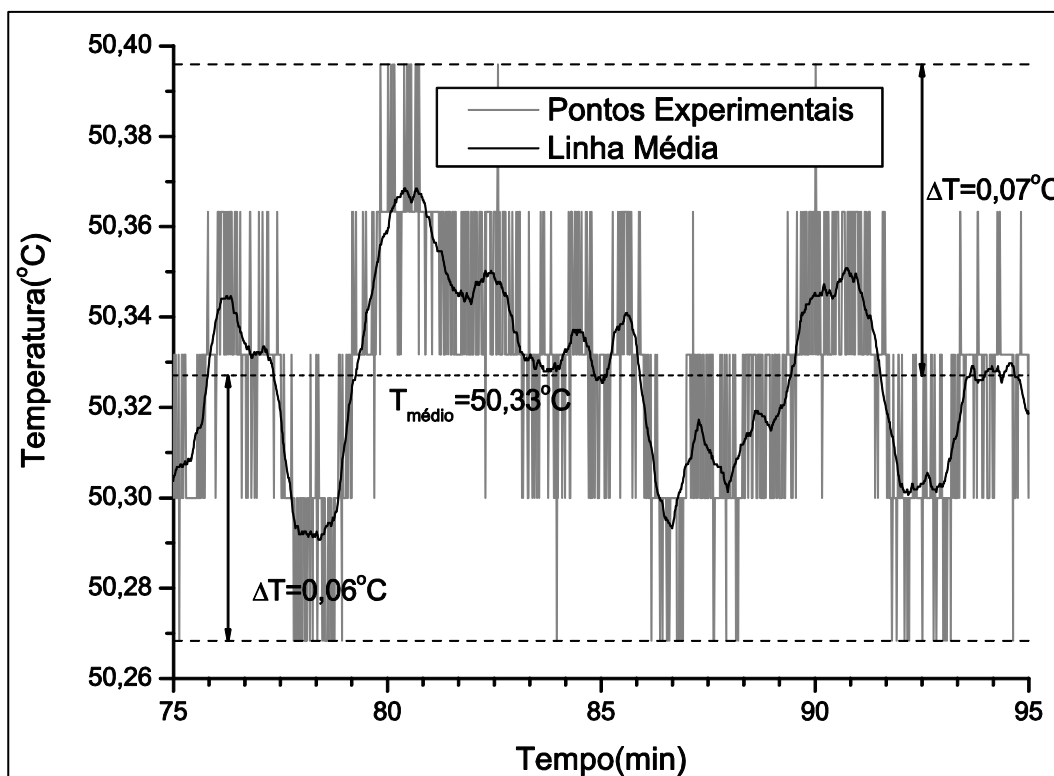


Figura 5.16 - Gráfico da temperatura interna quando há perturbação próxima a 50,2°C.



A Figura 5.16 mostra o gráfico do comportamento da temperatura interna quando há a perturbação já apresentada na Figura 5.15, a oscilação da temperatura em regime é de 0,13°C, comparável a oscilação apresentada nos outros ensaios e o erro de controle é de +0,13°C. Com estes gráficos pode-se observar que com perturbações externas, a temperatura interna da câmara térmica tende a se manter estável, oscilando somente dentro da faixa já observada em testes em que não são provocadas estas perturbações.

## 5.2. Resultados Relativos ao Módulo de Alta-tensão

Os ensaios realizados com o módulo de alta-tensão descrito no capítulo 3.3, utilizando instrumentos como: gerador de funções, multímetro e analisador de sinais, tiveram o objetivo de validar o método de eliminação de harmônicas descrito no capítulo 4.2.2..

Para avaliar a qualidade do sinal calcula-se o total de distorções harmônicas no sinal antes e depois da correção utilizando a seguinte fórmula:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_\infty^2}}{V_1} \quad (5.4)$$

Para o primeiro ensaio o sinal antes da correção é mostrado na Figura 5.17, este sinal é a resposta de um circuito a uma senóide de 1 kHz, observa-se até a sétima harmônica, com estas harmônicas com valores não menores do que -50 dBVrms de amplitude. O ruído está por volta de -80 dBVrms, e isto por causa da resolução do analisador de sinais. O total de distorções harmônicas (THD) no sinal inicial é de 0,015082, usando no cálculo as sete harmônicas.

A Figura 5.18 apresenta o gráfico do espectro de freqüências para o sinal de 1 kHz depois das correções, o THD foi reduzido para 0,00021, consideravelmente menor ao inicial.

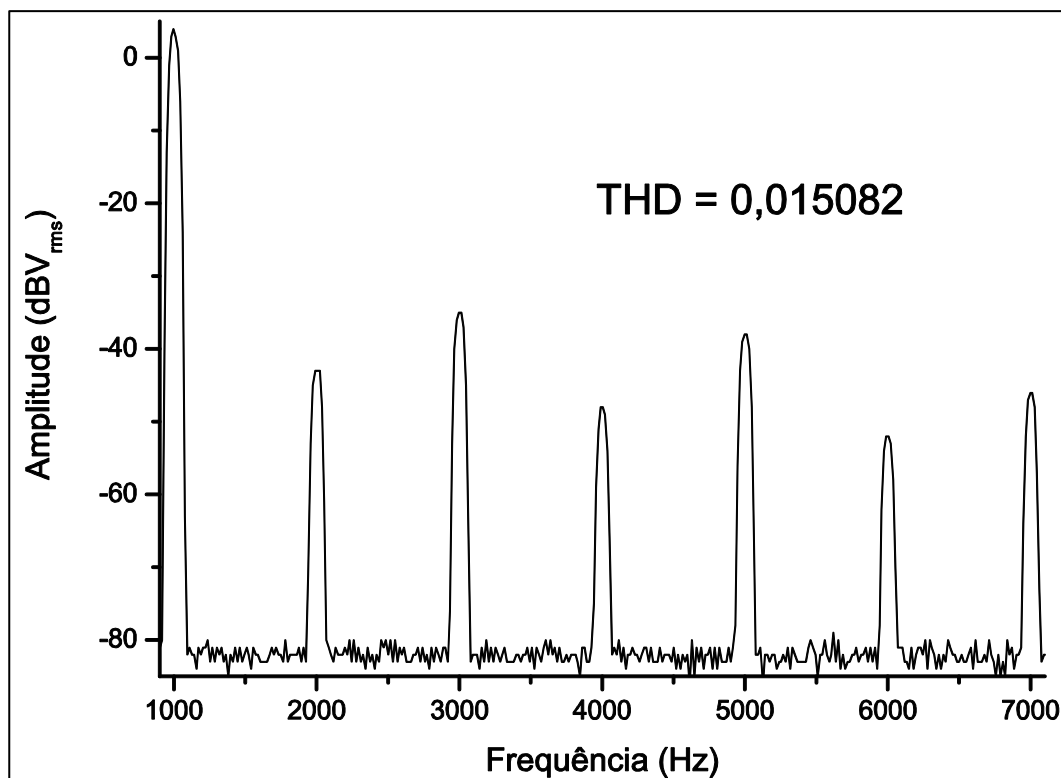


Figura 5.17 - Gráfico do sinal de 1kHz antes da eliminação das harmônicas.

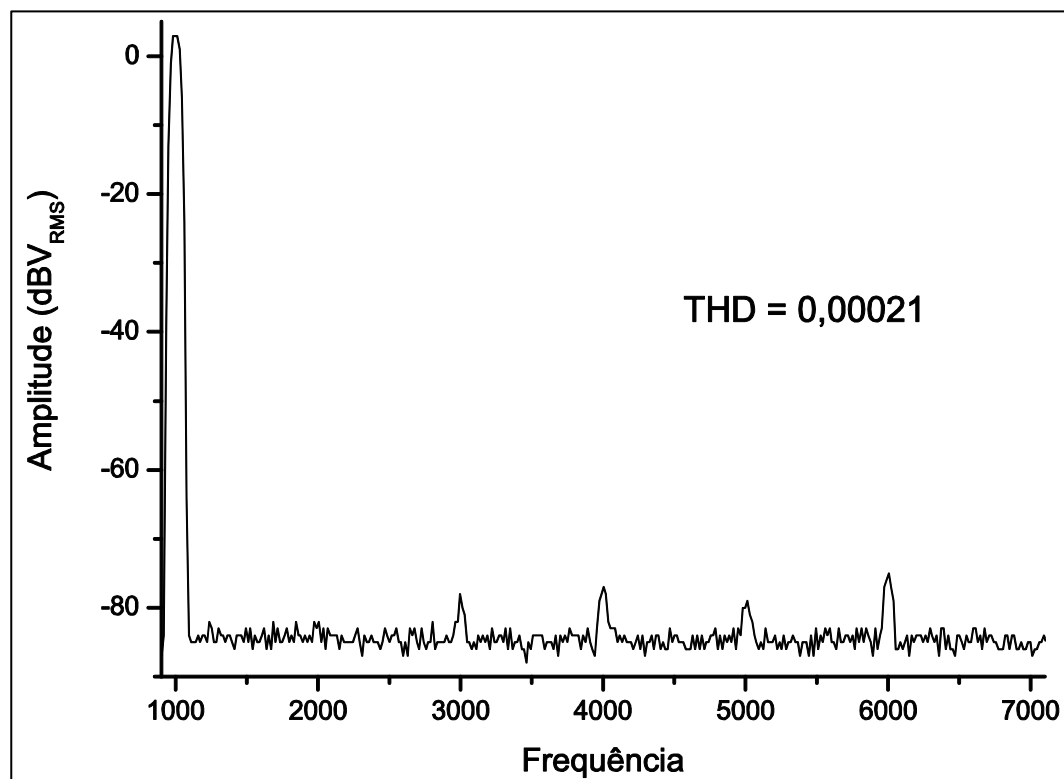


Figura 5.18 - Gráfico do sinal de 1kHz depois da eliminação das harmônicas.

Observam-se picos devido a harmônicas no sinal, pois foi determinado que a correção terminasse quando todas as harmônicas possuísem valores menores ou iguais a -75 dB.

O outro ensaio é feito utilizando as distorções provocadas por um transformador de tensão, condição que está muito próxima a observada com o transformador de alta-tensão. O espectro de freqüências do sinal de saída do transformador pode ser observado na Figura 5.19.

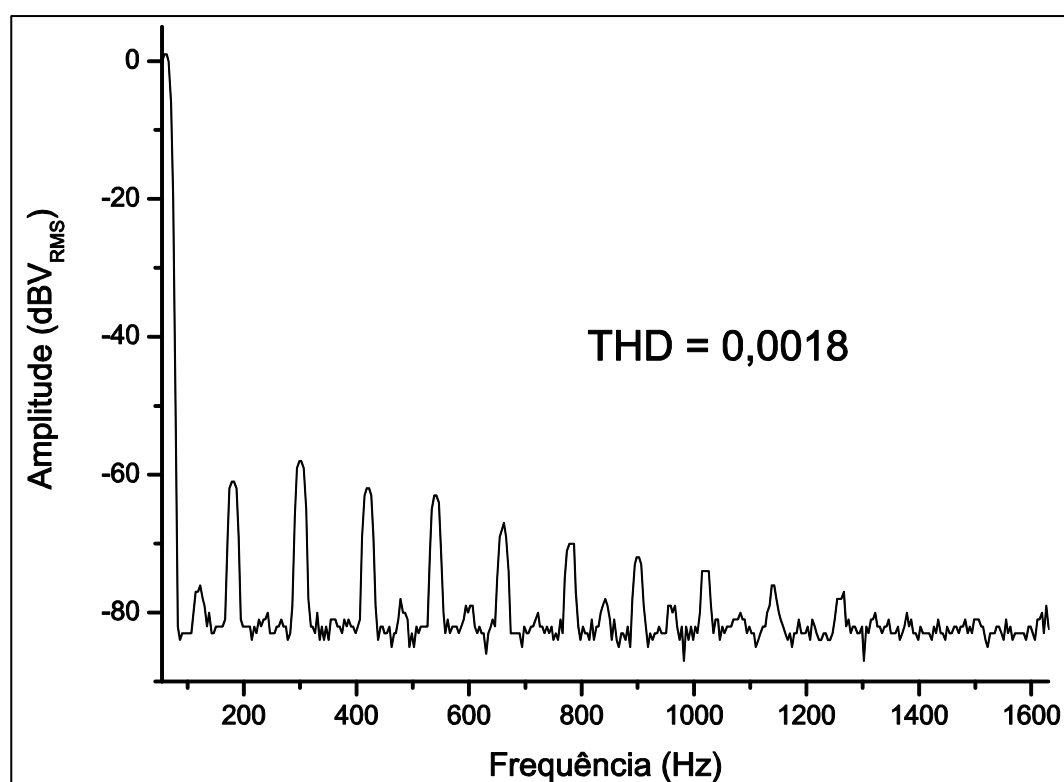


Figura 5.19 - Gráfico do sinal de 60Hz antes da eliminação das harmônicas.

O sinal inicial é uma senóide de 60 Hz, o espectro analisado compreende agora vinte harmônicas do sinal, e desta vez busca-se também o ajuste da amplitude do sinal de saída controlando os valores de entrada.

O gráfico da Figura 5.20 é o espectro do sinal já com as harmônicas corrigidas e amplitude ajustada para no ponto de amostragem possuir 1 Vrms.

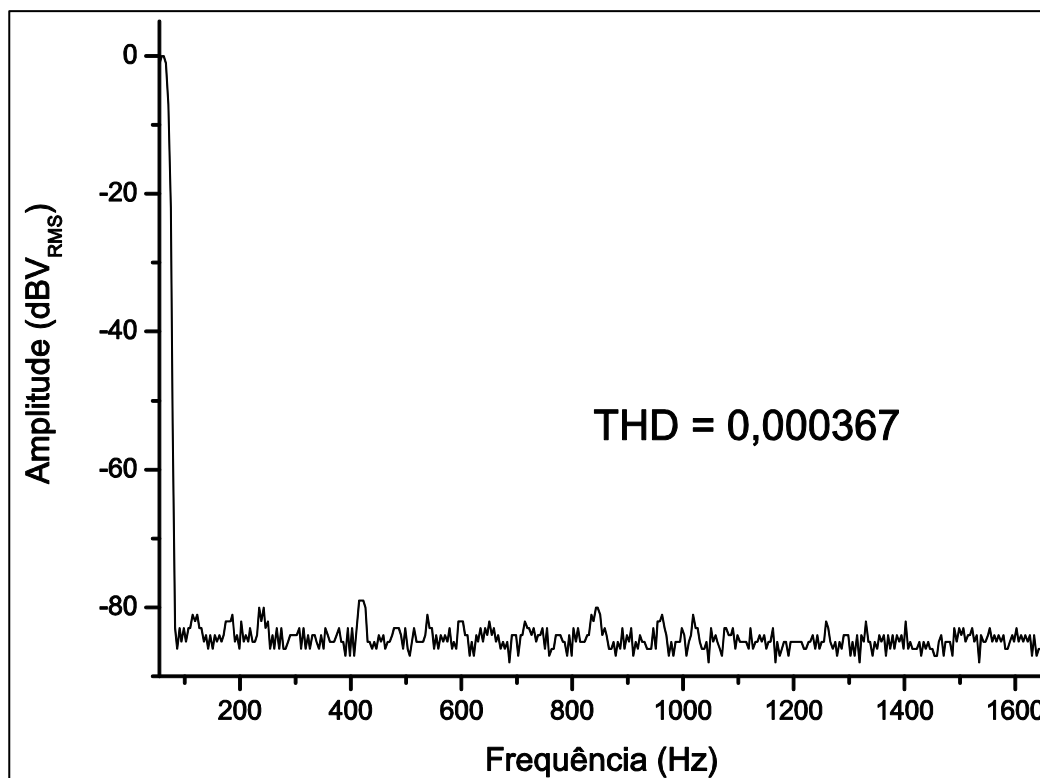


Figura 5.20 - Gráfico do sinal de 60 Hz depois da eliminação das harmônicas.

Para este ensaio a limitação das correções foi diminuída, para serem consideradas aceitáveis as distorções poderiam ter o valor máximo de -78 dBVrms. Neste ensaio também foi possível observar qual o erro no ajuste da amplitude do sinal na saída, definiu-se 1 Vrms como amplitude desejada, porém no multímetro pode-se medir 0,99990 Vrms como sendo a amplitude, a partir deste valor o sistema não conseguia aproximar mais o valor, resultando em um erro de 0,01%, e então foi definido no programa de controle para as correções encerrarem quando a diferença entre a tensão medida e a desejada forem inferiores ou iguais a 0,0001 Vrms.

O programa de controle salva automaticamente o último espectro do sinal que foi observado e também os dados transmitidos ao gerador de funções, dados estes que contém a informação relativa ao último sinal gerado, que pode ser armazenado para utilização futura. Para o último ensaio, com a senóide de 60 Hz, foi obtido o espectro de frequências do sinal, que é apresentado na Figura 5.21.

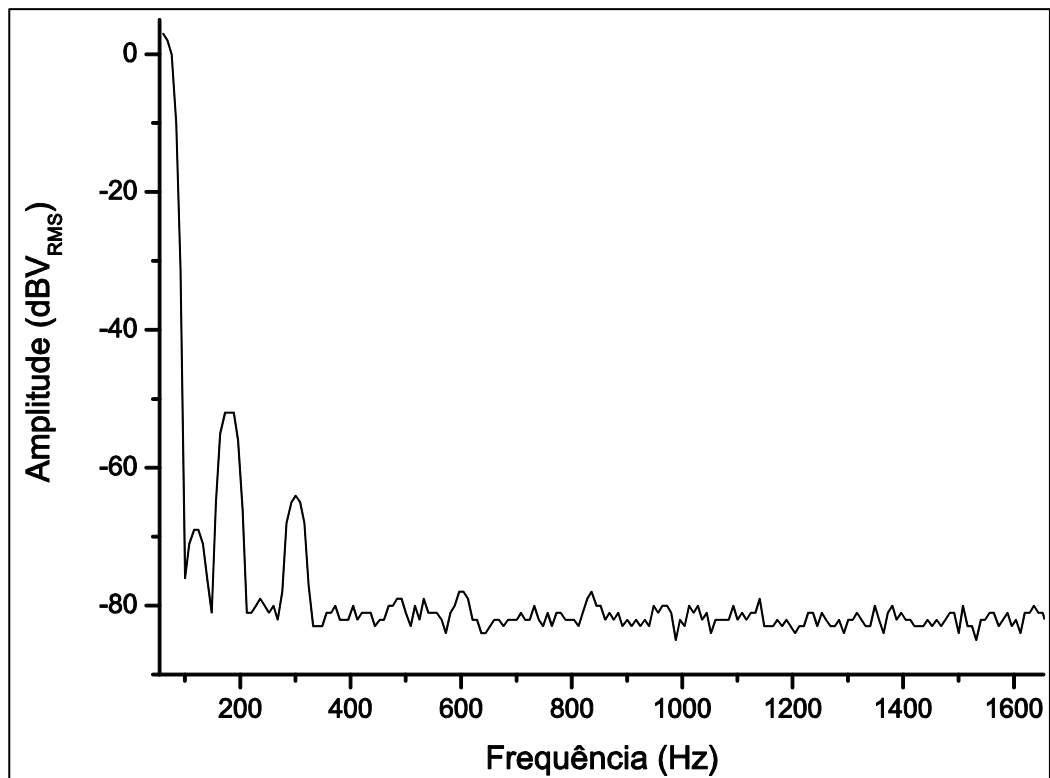


Figura 5.21 - Gráfico do espectro do sinal de 60 Hz na saída do gerador de funções.

Com este gráfico é plenamente observável como o método de eliminação de harmônicas atua gerando um tom com fase contrária a harmônica observada no sinal, para o sinal de 60 Hz os principais tons gerados para a compensação se encontram em 120 Hz, 180 Hz e 300 Hz, que são a segunda, terceira e quinta harmônicas.

## CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido composto por dois módulos principais, uma câmara térmica e outro equivalente a um *Hipot* teve resultados próximos ou melhores do que os equipamentos encontrados comercialmente, ver Apêndice D para os comparativos na forma gráfica.

Foi desenvolvida uma câmara térmica portátil de alto desempenho e baixo custo. Com o uso de uma técnica com duplo TEM. O volume e peso reduzidos possibilitam que ela seja de facilmente transportada, já que pode ser alimentada com duas baterias de 12 V, tornando possíveis trabalhos em campo.

Sua construção permite que nitrogênio gasoso ou outros gases possam ser introduzidos na câmara, para que se testes com umidade reduzida possam ser realizados.

A faixa de operação da câmara é de 0°C a 70°C, podendo-se alcançar temperaturas pouco além dessa faixa. As características de flutuação da temperatura em regime (de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ) e de erro na temperatura em relação ao *setpoint* ( $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ) são excelentes, superando a grande maioria das câmaras térmicas disponíveis comercialmente, porém com um custo de fabricação cerca de uma ordem de grandeza inferior.

Há algumas propostas para ampliação da faixa de operação, como alterar o método de refrigeração do módulo termoelétrico superior, usando um *chiller* com água refrigerada, ao invés do dissipador com ventilador atual, isto auxiliaria na redução da temperatura interna. Para ultrapassar seguramente os 70°C, há a necessidade de um sistema de aquecimento paralelo e uma forma de deixar os módulos termoelétricos abaixo de 80°C, a potência extra seria fornecida pelo circuito dos TIPs apresentado, enquanto os TEM seriam deixados ativos apenas para manter a temperatura nas suas placas inferior à 80°C. Há também a possibilidade de aumentar a isolação do sistema e buscar uma forma de vedar

melhor o sistema de forma que existam menos fugas entre a câmara interior e o ambiente externo.

Para a parte de alta-tensão, o método proposto para a eliminação das distorções harmônicas mostrou-se efetivo e capaz de reduzir o THD para 0,000367 utilizando vinte harmônicas para o cálculo. Para a montagem utilizando os equipamentos de laboratório isso significa deixar as harmônicas praticamente no mesmo nível do ruído, garantindo assim uma grande qualidade do sinal.

Relacionado ao controle da amplitude da tensão a montagem utilizada avaliou o erro como cerca de 0,01%, um erro pequeno, e caso seja extrapolado para altas-tensões chega-se a erros da ordem de poucas dezenas de volts, e não mais centenas.

Para a continuidade dos trabalhos da parte de alta-tensão é interessante desenvolver o circuito proposto no Apêndice A, reduzindo o uso dos equipamentos de laboratório e deixando o grosso da necessidade computacional para o computador fazer, e podendo fazer a integração do sistema por completo.

Outro processo que poderia ter continuidade é um método de compensação das harmônicas para sinais arbitrários, buscando de alguma forma a comparação do sinal esperado e o sinal obtido, para num sinal composto por uma soma de senóides. Um exemplo seria uma onda que teria comportamento espectral de pente de senóides com todas com amplitudes diferentes, porém quando o sinal passa pelo transformador o sinal da segunda harmônica é somado a uma distorção da primeira harmônica, modificando o sinal de saída de forma indesejada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Astrom, K.J. and T. Häggglund. (1994). *PID controllers: theory, design, and tuning*. Instrument Society of America, New York.

Avilez Fo, O. V. (1978). Projeto e Construção de um Controlador de Temperatura para Fornos de Difusão. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP.

Bradley, C.C., J. Chen and R. G. Hulet (1990). Instrumentation for the stable operation of laser diodes. *Rev. Sci. Instrum.* Vol 61, nº8. pp 2097-2101.

Cincinnati Sub-Zero Products, Inc (2009). *StableClimate Stability Chambers*.

Disponível em:

[http://www.cszindustrial.com/products/tempchambers/stability\\_chambers.htm](http://www.cszindustrial.com/products/tempchambers/stability_chambers.htm).

Acesso em: 2 ago 2010.

Espec North America Inc. *SU-221: 0.8 Cubic Foot SU Series Benchtop*. Disponível em: [http://www.espec.com/na/products/model/su\\_221/](http://www.espec.com/na/products/model/su_221/). Acesso em: 2 ago 2010.

Flaxer, E. (2003). Implementing of a precision fast thermoelectric cooler controller using a personal computer parallel port connection and ADN8830 controller. *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 74, nº8. pp 3862-3873.

High Voltage Inc. *Aerial Lift & Bucket Truck Tester Model ALT-120/60*. Disponível em: [http://www.hvinc.com/downloads/ALT\\_Brochure.pdf](http://www.hvinc.com/downloads/ALT_Brochure.pdf). Acesso em: 2 ago 2010.

Laird Technologies. *A-Z Thermoelectric Design*. Disponível em:

<http://www.lairdtech.com/Products/AZTec-Software-Download/>. Acesso em: 20 nov 2009.

Laird Techonologies. (2008). *Ceramic Plate Series CP14,127,045 Datasheet*.

Disponível em:

<http://www.lairdtech.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemID=4291>.

Acesso em: 13 mar 2009.

Laird Techonologies. (2009). *Multistage Series MS4,115,14,15 Datasheet*.

Disponível em:

<http://www.lairdtech.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemID=3124>.

Acesso em: 1 jun 2010.

Memmert. *Constant Climate Chamber HPP 108*. Disponível em:

[http://www.memmert.com/fileadmin/template/memmert/pdfdata/HPP%20108\\_EN.pdf](http://www.memmert.com/fileadmin/template/memmert/pdfdata/HPP%20108_EN.pdf). Acesso em: 2 ago 2010.

Multitec. *Hipot Mod EH510P*. Disponível em:

<http://www.multitecmed.com.br/Instrumentos/Eletroteste/EH510P.htm>. Acesso em: 2 ago 2010.

Page, M. *Akasa Nero AK-967 Heatsink Review*. Disponível em:

<http://www.frostytech.com/articleview.cfm?articleID=2354>. Acesso em: 5 abr 2010.



Sloman, A. W. (2004) Comment on “Implementing of a precision fast thermoelectric cooler using a personal computer parallel port connection and ADN8830 controller” [Rev. Sci. Instrum. 74, 3862 (2003)]. *Rev. Sci. Instrum.* Vol 75, nº3. pp 788-789.

Svrcek, W.Y., D.P. Mahoney and B.R. Young. (2006). *A Real-Time Approach to Process Control*. Wiley, West Sussex.

University Central China Sci & Technology. Liu J., X Yi e Z He. *High-precision temperature control circuit for thermoelectric cooler*. CN1453674-A em 23 mai 2003. Disponível em:  
[http://apps.isiknowledge.com/full\\_record.do?product=UA&search\\_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=2EPPfkIK55JIMKmCfoA&page=1&doc=1&colname=DII](http://apps.isiknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=2EPPfkIK55JIMKmCfoA&page=1&doc=1&colname=DII). Acesso em: 16 abril 2010.

Vitrek. *V60 Series Programmable AC-DC Hipot / Electrical Safety Testers with Insulation Resistance and Ground Continuity*. Disponível em:  
[http://www.vitrek.com/hipot\\_insulation\\_resistance\\_ground\\_continuity\\_tester\\_v60\\_v61\\_v63.asp](http://www.vitrek.com/hipot_insulation_resistance_ground_continuity_tester_v60_v61_v63.asp). Acesso em: 2 ago 2010.

## APÊNDICE A – PROPOSTA DE CIRCUITO PARA O MÓDULO DE ALTA-TENSÃO

O módulo de alta tensão apresentado no texto principal é composto por vários equipamentos de laboratório, neste apêndice há a proposta de um circuito que desempenharia papel semelhante aos instrumentos. A alteração que seria necessária no programa feito em Labview é de fazer o FFT no computador com dados no domínio do tempo repassados por este circuito. Na figura A.1 é possível ver o diagrama de blocos da proposta para este módulo.

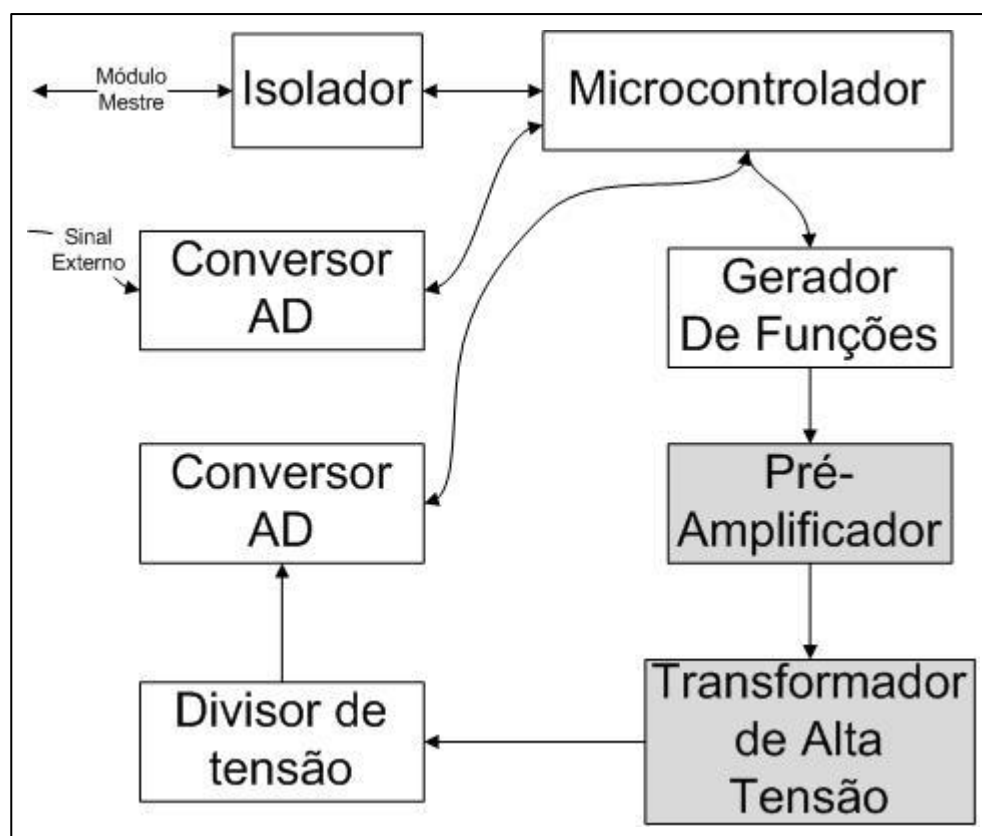


Figura A.1 – Diagrama de blocos do Módulo de Alta Tensão.

Este módulo possui comunicação com o módulo de interface através de um isolador e interface RS485/USART, os isoladores nos três circuitos foram postos por causa deste módulo, a fim de isolar a alta-tensão do restante do sistema.

O microcontrolador tem como funções a comunicação com o módulo mestre, o comando do gerador de funções e controle e aquisição dos dados dos dois conversores analógico-digitais existentes no circuito.

O gerador de funções exige uma estrutura bastante complexa, composta por memórias, contador e um conversor digital-analógico, que está descrita no próximo capítulo.

O sinal de saída do gerador de funções possui uma amplitude pequena para ser ligado no transformador de alta tensão, cerca de 2,5 volts de pico, para elevar essa amplitude se usa um pré-amplificador, que sobe a tensão para até 50 volts de pico.

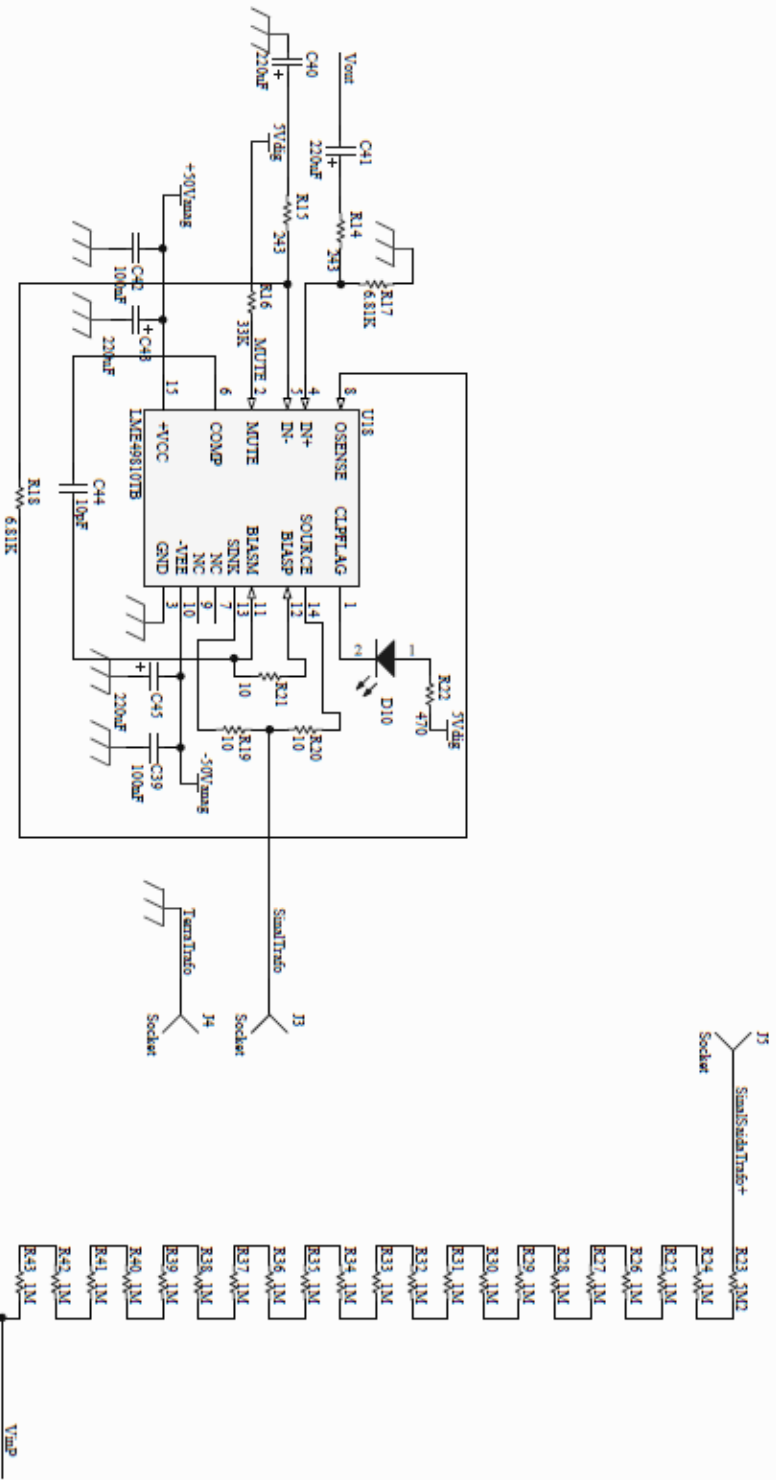
Depois de pré-amplificado o sinal pode então ser colocado no primário do transformador de alta-tensão, que tem uma saída de até 15 kV. Para o controle preciso do sinal de saída do transformador se faz uso de uma malha de realimentação, para isto o sinal de saída deve ser amostrado.

O divisor de tensão resistivo tem como finalidade pegar o sinal de alta-tensão, com amplitude de até 15kV, e através de vários resistores em série, dividir a tensão até uma amplitude de 5 volts.

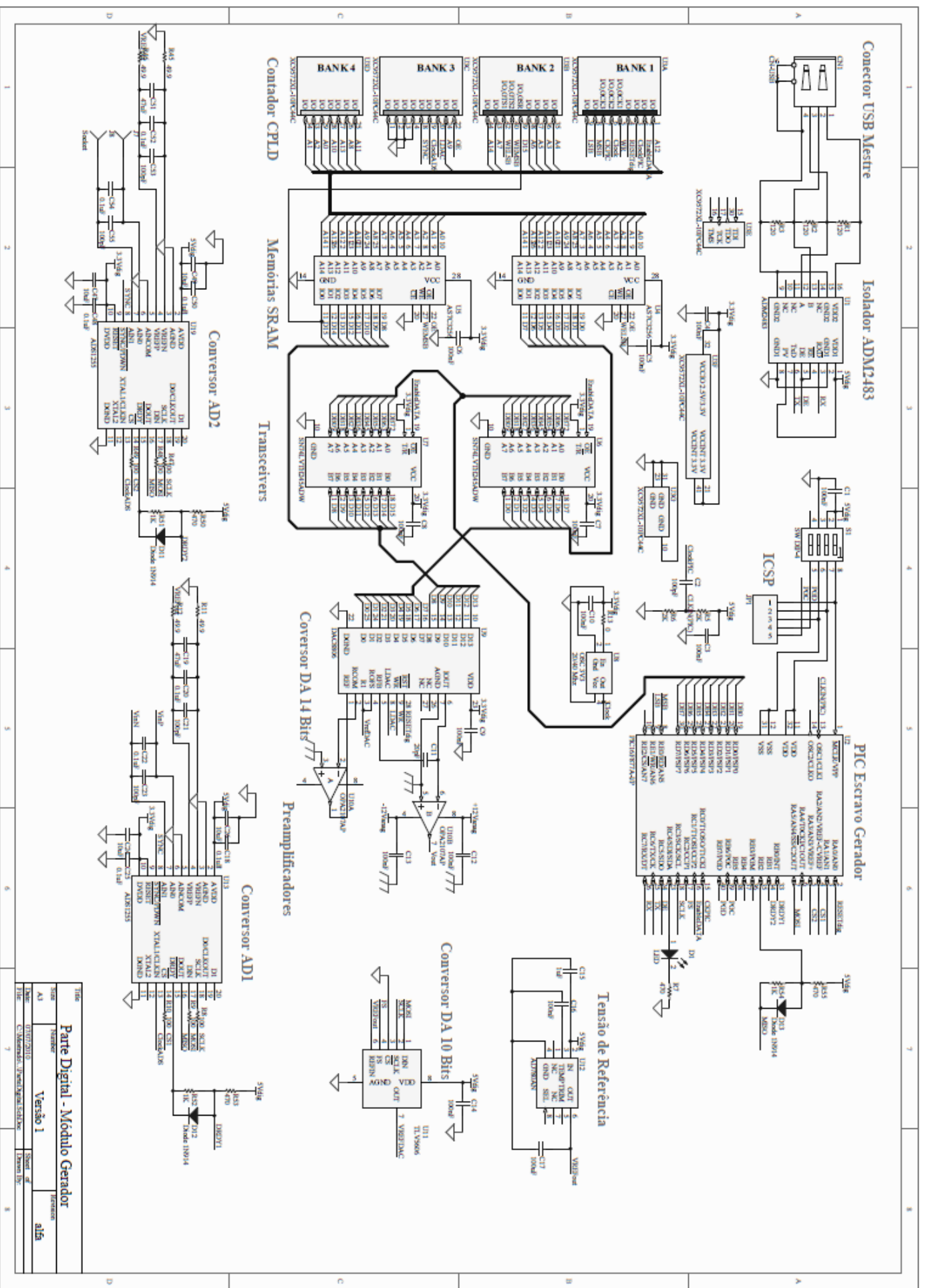
Os conversores analógico-digitais têm duas funções, a primeira é amostrar o sinal oriundo da ponte divisora e mandar estes dados para o microcontrolador que através do módulo mestre enviará os mesmos para o microcomputador que realiza os cálculos para correção do sinal. A segunda função é adquirir um sinal externo, possivelmente até de um circuito que está dentro da câmara de temperatura que tem alguma resposta que se deseja medir.

Os conversores analógico-digitais possuem grande importância no circuito, porque são eles que limitam o controle do sinal de saída do transformador, a resolução deles que define a qualidade das medidas.

O módulo de alta-tensão possui duas fontes de alimentação, uma de baixa potência utilizada na parte digital do circuito e outra com uma potência maior para a parte analógica.



Title			
Parte Analógica - Módulo Gerador			
Size	Number	Revision	
A4		Versão 1	
Date	07/07/2010		Sheet of
File	C:\Metrado\ParteAnalógica SsdDoc		Drawn By:



# Parte Digital - Módulo Gerador

Nome	AI1
Revisão	01/07/2015
Arquivo	C:\Arquivos e Pastas\Projeto\Projeto\Projeto.dwg
Desenhado por	almeida

## **APÊNDICE B – PROPOSTA AUXILIAR DE AQUECIMENTO**

Neste apêndice é apresentado um circuito que pode ser utilizado para aumentar a temperatura interna da câmara térmica. Este circuito consiste em um NTC para obtenção da temperatura próxima aos atuadores que são transistores de potência (TIPs), que são utilizados para esquentar, um controlador PID com um sinal DC de saída que se liga a base dos TIPs induzindo-os a condução, e utiliza-se o fato deles gerarem até 15 Watts cada um durante a condução para aquecer a câmara. Na Figura B.1 é mostrado o circuito para auxílio no aquecimento da câmara térmica.

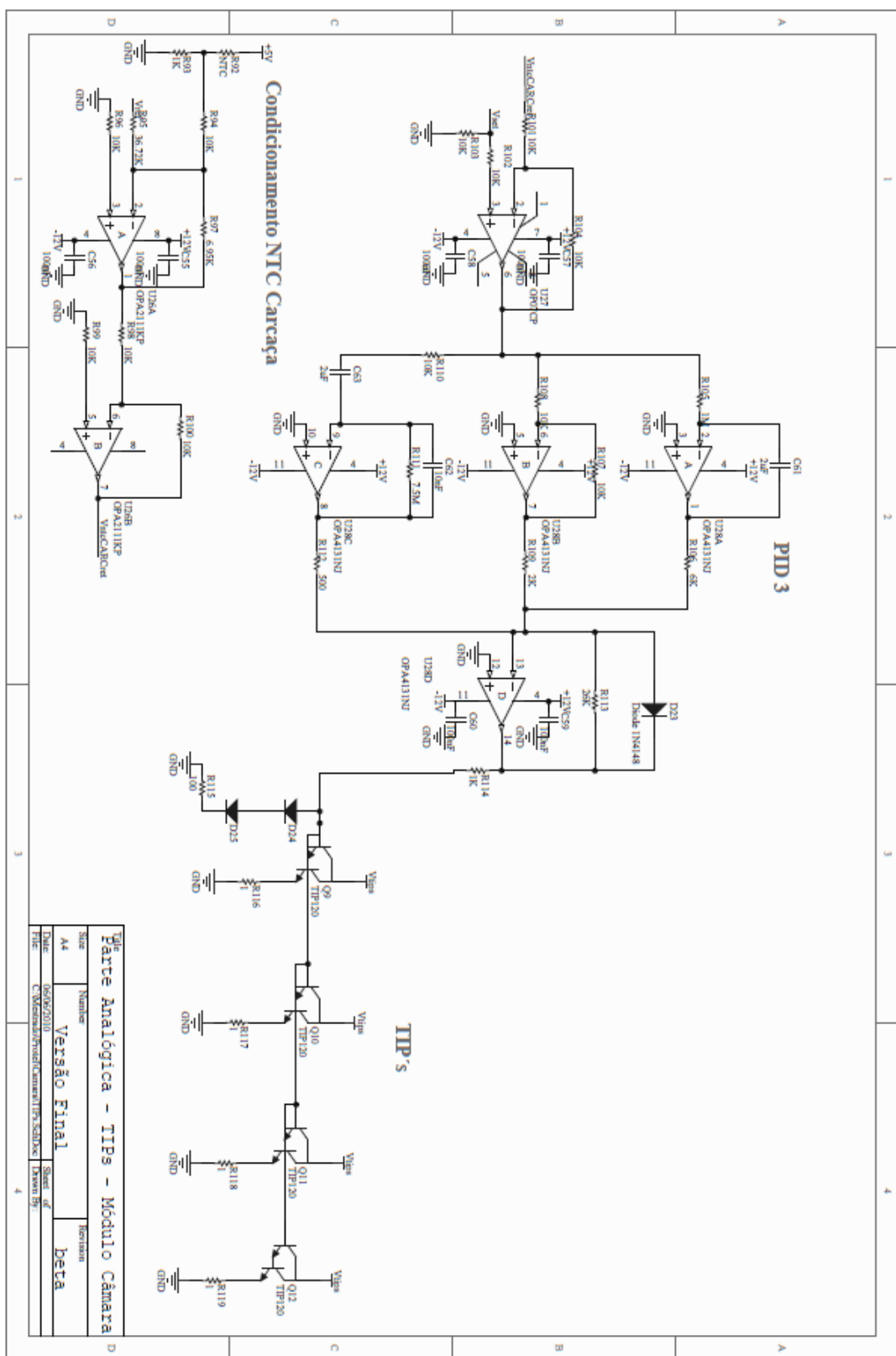


Figura B.1 – Esquemático do circuito auxiliar proposto.



## APÊNDICE C – CÁLCULOS DE SINTONIA PID

Há dois métodos que foram utilizados na tentativa de sintonia dos parâmetros dos controladores PID presentes no trabalho: o primeiro método é o método de Ziegler-Nichols e o segundo o método de Cohen-Coon. Contudo os dois métodos retornaram parâmetros que se mostraram inúteis no sistema, pois fazia com que este oscilasse, neste apêndice é apresentado o método para o cálculo e os resultados.

Ambos os métodos fazem uso da resposta ao degrau no controle do sistema, no qual se espera o sistema ficar em regime, rapidamente varia-se a entrada do sistema, criando o degrau e aguarda-se até o sistema chegar novamente em regime, guardando o comportamento da saída do sistema.

O método de Ziegler-Nichols proposto em Aström (1994) analisa o comportamento da saída do sistema, a Figura C.1 apresenta o gráfico para a caracterização do sistema e obtenção dos parâmetros para sintonia do sistema.

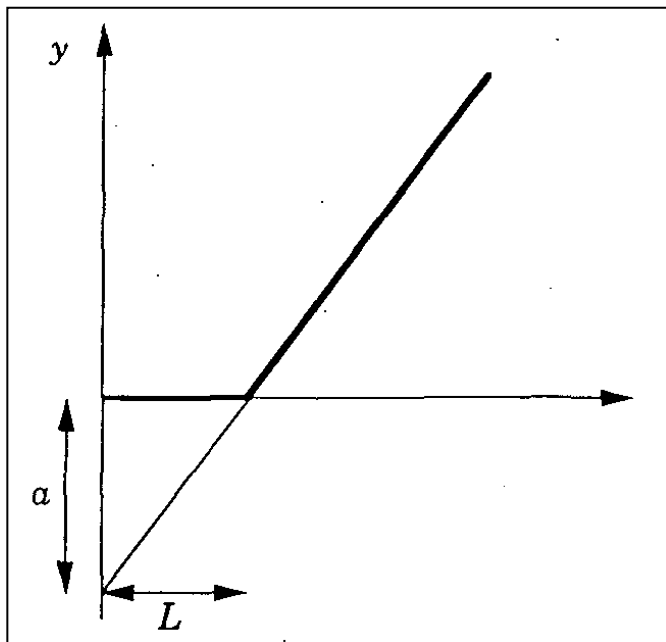


Figura C.1 – Gráfico para caracterização do sistema usando o método de Ziegler-Nichols.

Fonte: ASTROM (1994)

O parâmetro  $L$ , denominado tempo de resposta do sistema, é obtido diretamente do gráfico, que é a diferença do instante que o sistema começa a responder a variação da entrada e do instante na qual há a mudança na entrada. Para parâmetro  $\alpha$  há a necessidade de cálculos, aproxima-se a curva da resposta da saída do sistema por uma reta e extrapola-se a reta calculada para o instante em que há a variação na entrada, faz-se a diferença do valor extrapolado e do valor medido, esta diferença é então dividida pela variação do sinal de entrada do sistema(P), resultando no valor de  $\alpha$ . Após a determinação de  $L$  e  $\alpha$ , os ganhos são calculados através da tabela da Figura C.2.

<i>Controller</i>	<i>K</i>	<i>T<sub>i</sub></i>	<i>T<sub>d</sub></i>	<i>T<sub>p</sub></i>
P	$1/\alpha$			$4L$
PI	$0.9/\alpha$	$3L$		$5.7L$
PID	$1.2/\alpha$	$2L$	$L/2$	$3.4L$

Figura C.2 – Tabela para obtenção dos ganhos utilizando o método de Ziegler-Nichols.

Fonte: Astrom(1994).

Os valores obtidos para os ganhos pelo método de Ziegler-Nichols são mostrados na tabela abaixo:

TABELA C.1 – GANHOS PELO MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS

	DESCIDA		SUBIDA	
	TEM Inferior	TEM Superior	TEM Inferior	TEM Superior
A	0,344447	0,390252	0,352124	0,137385
L	29	11	74,4	12,6
Kc	3,483846	3,074934	3,407891	8,734558
Ti	58	22	148,8	25,2
Td	14,5	5,5	37,2	6,3

O método de Cohen-Coon proposto em SVRCEK (2006) faz uso do tempo que o sistema leva do início da resposta ao degrau até que a reta ajustada da saída do sistema chegue ao valor de regime, denominada T, do tempo de resposta ao degrau L, da variação percentual da saída do sistema  $\Delta C_p$  e da variação percentual no sinal de entrada (P%).

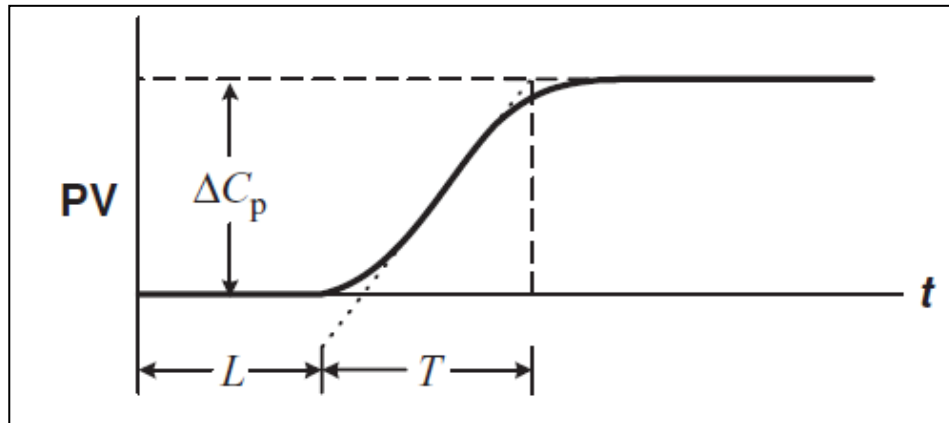


Figura C.3 – Gráfico da obtenção dos parâmetros para o método de Cohen-Coon.

Fonte: SVRCEK(2006)

Há ainda duas variáveis que precisam ser calculadas, N e R.

$$N = \frac{\Delta C_p}{T} \quad (C.1)$$

$$R = \frac{L}{T} \quad (C.2)$$

Com os parâmetros encontrados as seguintes fórmulas são utilizadas para o cálculo dos ganhos:

$$K_c = \frac{P}{NL} \left( 1,33 + \frac{R}{4} \right) \quad (C.3)$$

$$T_i = L \frac{(32+6R)}{(13+8R)} \quad (C.4)$$

$$T_d = L \frac{4}{11+2R} \quad (C.5)$$

Os resultados obtidos para o método de Cohen-Coon são apresentados na Tabela C.2.

TABELA C.2 – GANHOS CALCULADOS PELO MÉTODO DE COHEN-COON

	DESCIDA		SUBIDA	
	TEM Inferior	TEM Superior	TEM Inferior	TEM Superior
P%	100	100	100	100
$\Delta C_p$	100	100	100	100
L	74,4	12,6	29	11
T	5307	381,6	1840	407
N	0,018843	0,262055	0,054348	0,2457
R	0,014019	0,033019	0,015761	0,027027
Kc	95,11976	40,53	84,63621	49,46
Ti	182,0493	30,58592	70,90783	26,76892
Td	26,98576	4,554476	10,51532	3,98044

Para implementar esses valores de ganhos no controlador PID analógico é preciso calcular os resistores e capacitores da Figura 3.12 em função desses ganhos. A equação do controlador PID utilizado adaptado de AVILEZ (1978) é:

$$V_c = K_c V_e + \frac{1}{t_i} \int V_e dt + t_d \frac{dV_e}{dt} \quad (C.6)$$

Acarretando em:

$$K_c = \frac{R_{32}}{R_{30}} \cdot \frac{R_{35}}{R_{31}} \quad (C.7)$$

$$\frac{1}{t_i} = \frac{R_{35}}{R_{34}} \cdot \frac{1}{C_{21} R_{33}} \quad (C.8)$$

$$t_d = \frac{R_{35}}{R_{29}} R_{28} C_{23} \quad (C.9)$$

As duas tabelas mostram valores bastante diferentes para os ganhos dos controladores, e é observável uma discrepância entre os valores calculados para a resposta ao degrau no aquecimento e no resfriamento do sistema, o que o caracteriza como não-linear e aponta a possibilidade de que a resposta para cada ponto de operação seja diferente de outro ponto.

## APENDICE D – COMPARATIVOS NA FORMA GRÁFICA

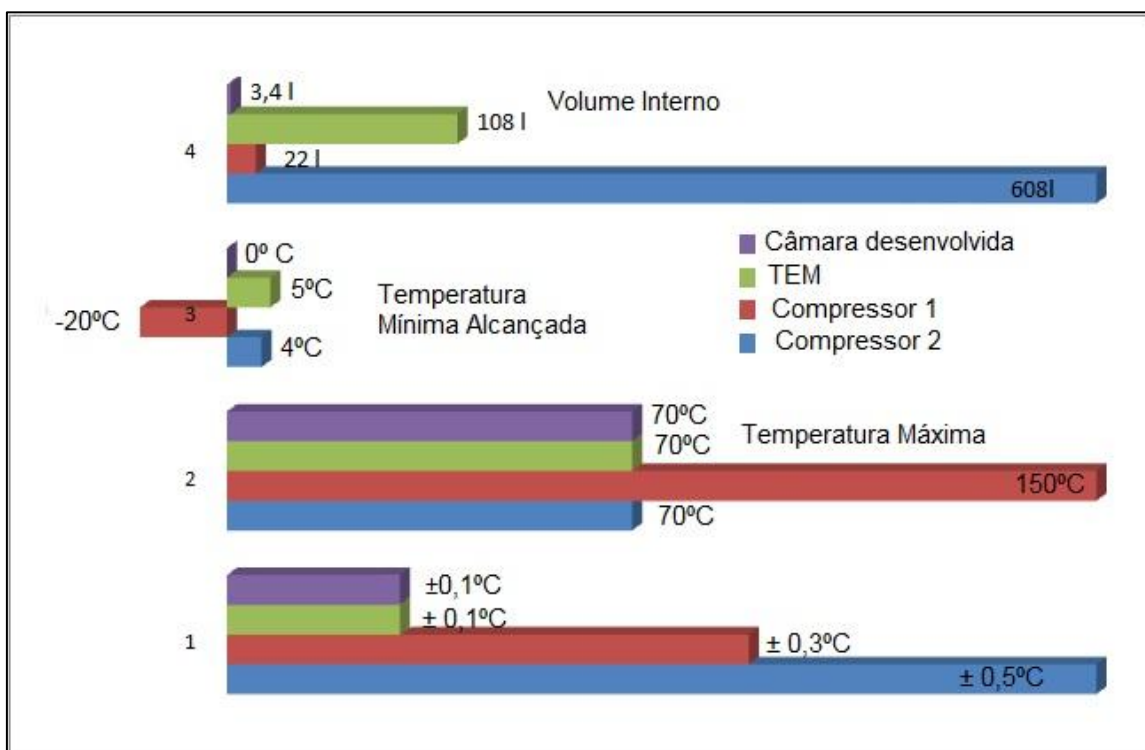


Figura D.1 – Gráfico comparativo das câmaras térmicas comerciais com a câmara desenvolvida.

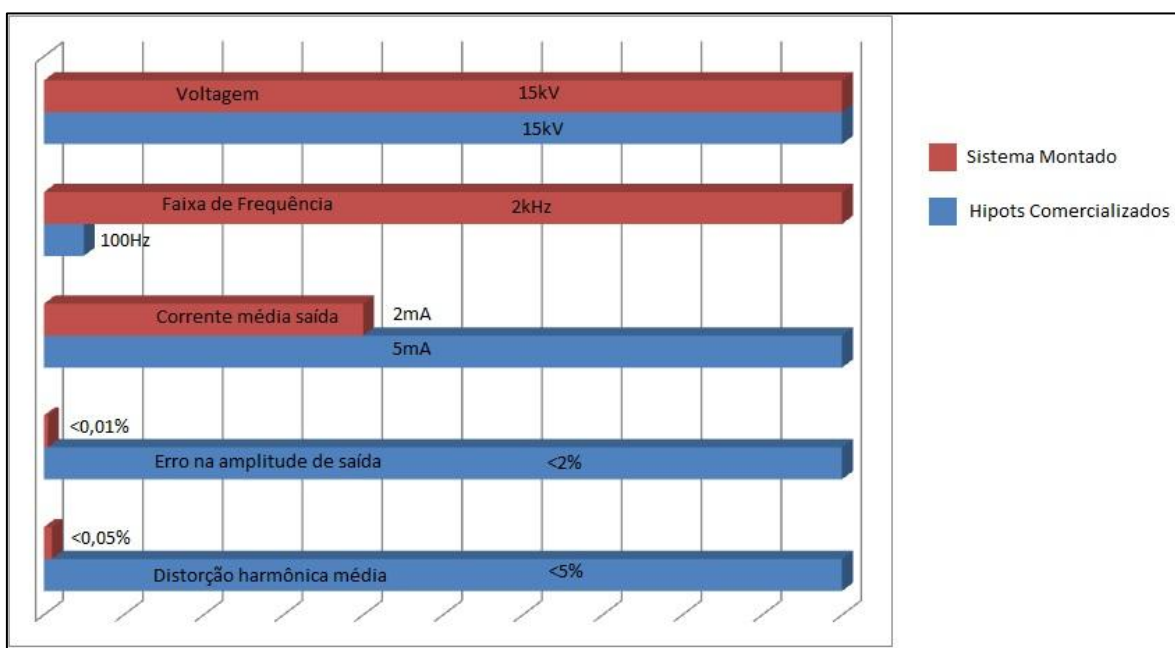
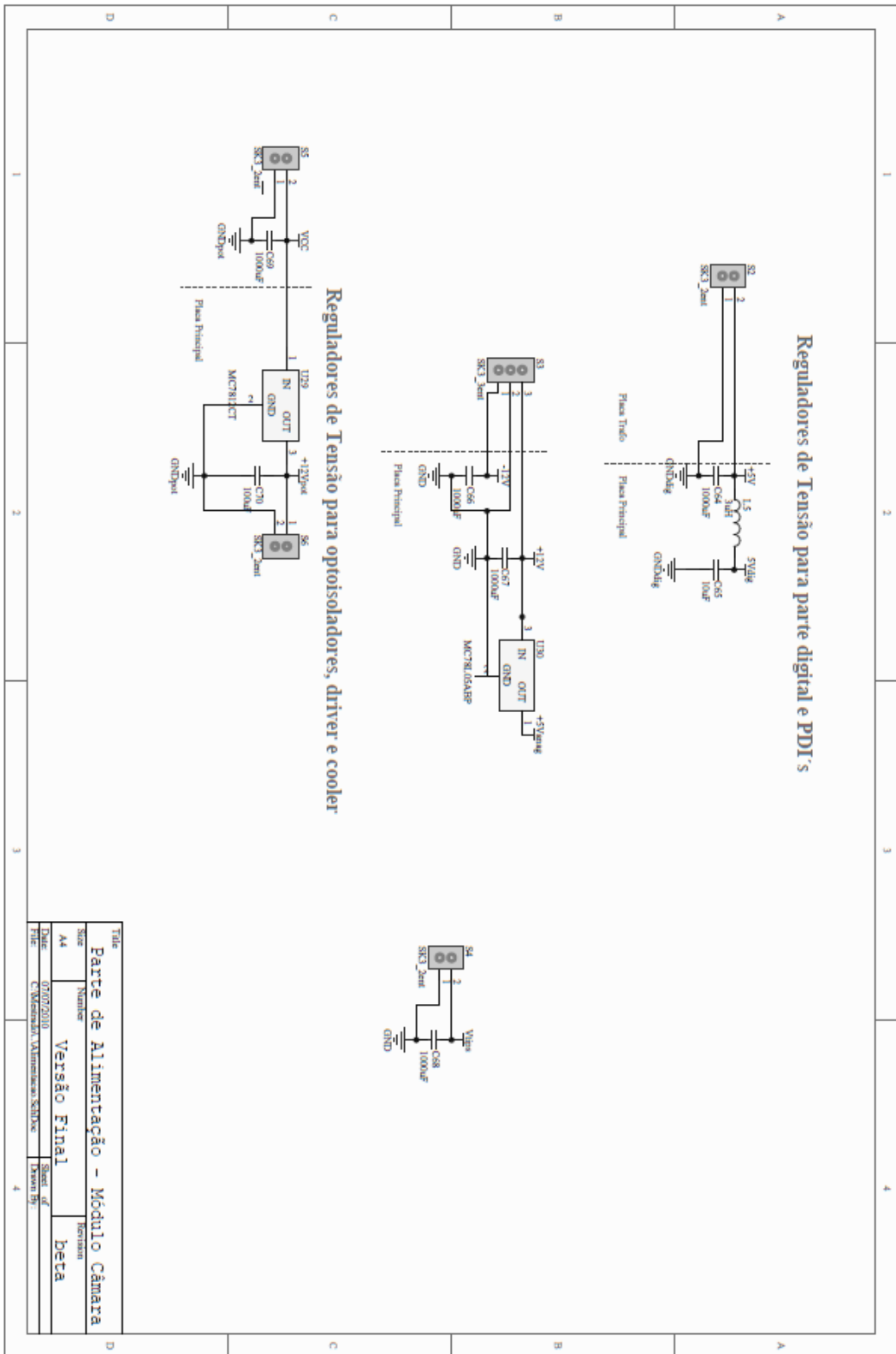


Figura D.2 – Gráfico comparativo dos Hipots comercializados e do desenvolvido.

## A.1 Módulo de Interface

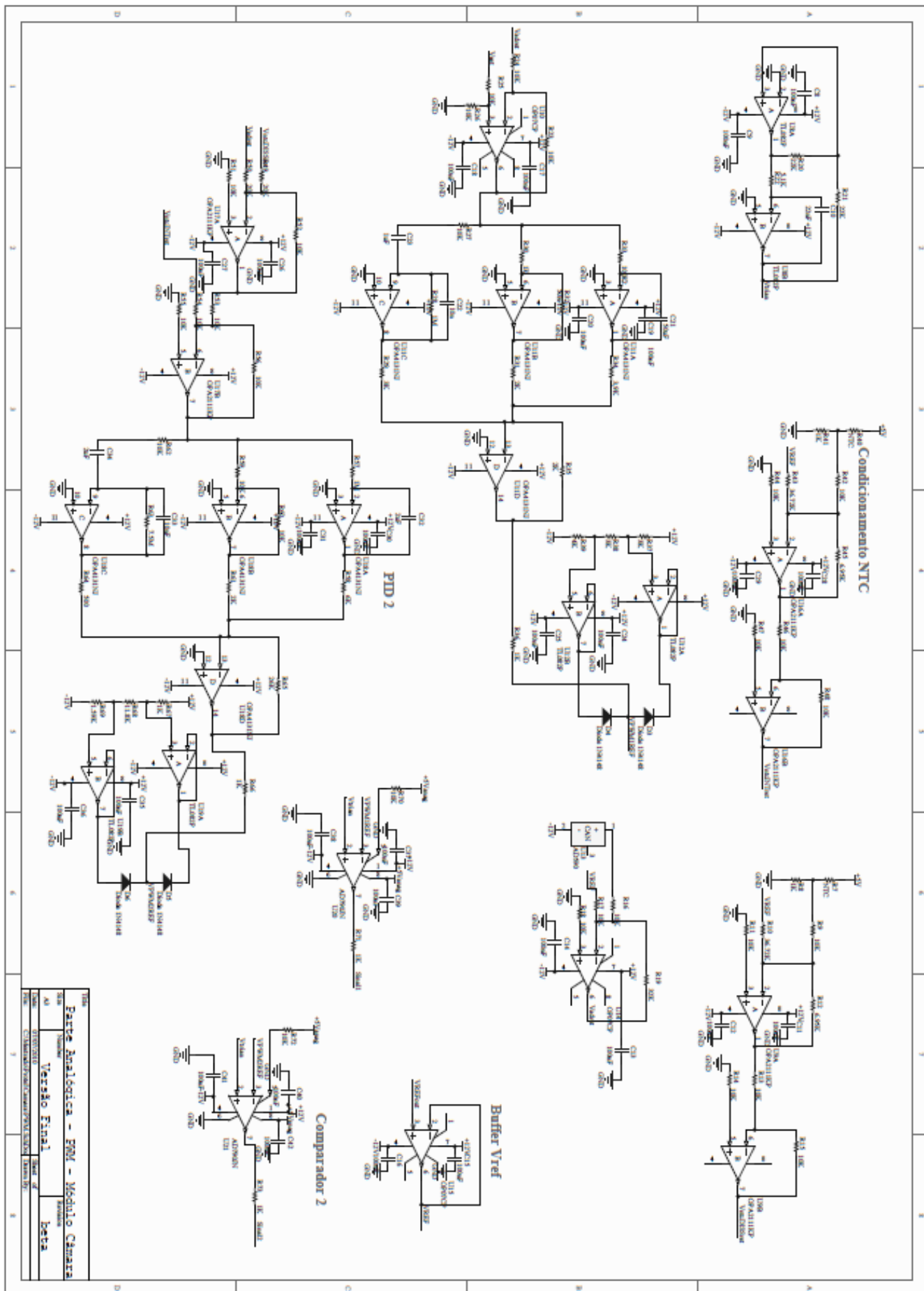


## A.2 Módulo Câmara

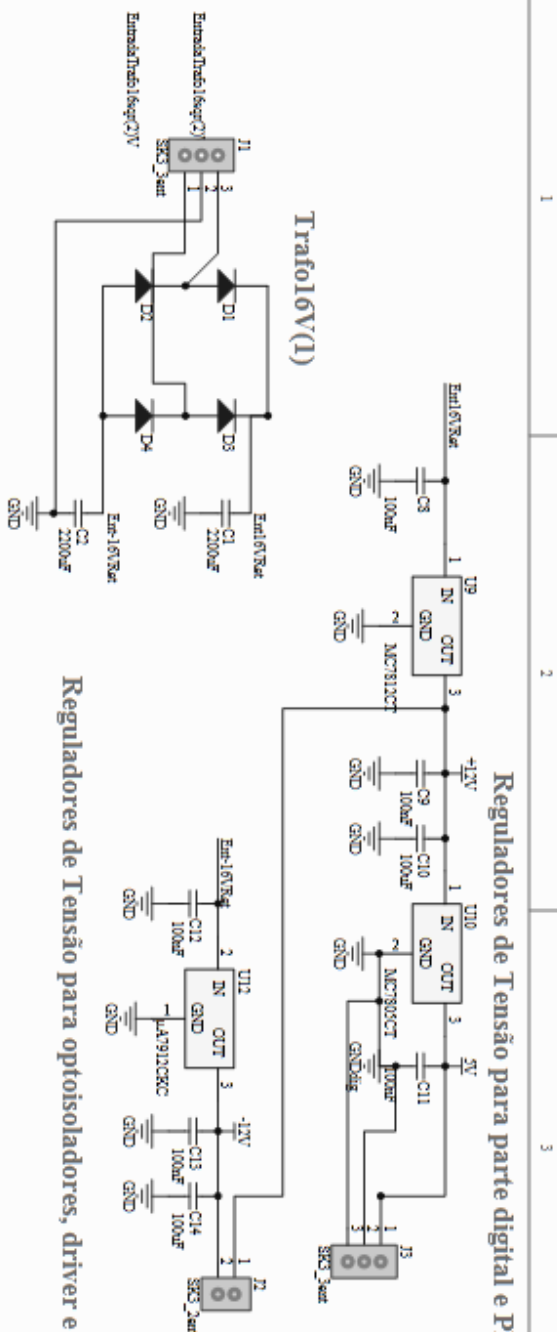






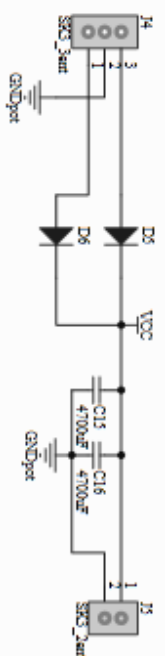






### Reguladores de Tensão para parte digital e PDI's

### Reguladores de Tensão para optoisoladores, driver e cooler



- Chico Fios da Saida:
- +12V Saug
- GNDSaug
- GNDSaug
- 12V Saug
- +5V Saug
- +12V port
- GNDSport
- 12V port

T22			
Fonte de Alimentação - Módulo Câmara			
Sheet	Number	Version	Revision
A4		Versão 2	alfa
Date:	07/07/2010	Sheet of	
File:	C:\MeuProjeto\Fonte S22.doc	Drawn By:	